Конференция и школа молодых учёных ПО АКТУАЛЬНЫМ ПРОБЛЕМАМ ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР

(с участием иностранных учёных)

посвящённые 50-летию образования Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики полупроводников им. А.В.Ржанова Сибирского отделения РАН

15-18 сентября 2014

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

НОВОСИБИРСК-2014

Организаторы

Сибирское отделение РАН

Федеральное агентство научных организаций

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки институт физики полупроводников им. А.В. РЖАНОВА СО РАН

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет

Новосибирский государственный технический университет

Национальный исследовательский Томский государственный университет

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева

Финансовая поддержка

Российский Фонд Фундаментальных Исследований

Логотипы





ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ











Со-председатели Конференции

А.Л. Асеев А.В. Латышев СО РАН, ИФП СО РАН ИФП СО РАН

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Председатель А.В. Двуреченский ИФП СО РАН Ученый секретарь И.Е. Тысченко ИФП СО РАН СПб АУ НОЦНТ РАН, Санкт-Петербург Ж.И. Алферов А.А. Андронов ИФМ РАН, Нижний Новгород С.В. Богланов ИФП СО РАН, Новосибирск ИФП СО РАН, Новосибирск П.А. Бохан ИФ СО РАН, Красноярск Н.В. Волков ИФ им. Б.И.Степанова НАН Беларуси, Минск С.В. Гапоненко Ю.В. Гуляев ИРЭ РАН. Москва А.Г. Забродский ФТИ им. А.Ф.Иоффе, С.-Петербург ОАО «НЗПП с ОКБ», Новосибирск В.И. Исюк ИФТТ РАН, Черноголовка В.В. Кведер ИФП СО РАН. Новосибирск З.Л. Квон С.Я. Килин НАН Беларуси, Минск ГНЦ «Курчатовский институт», Москва М.В. Ковальчук П.С. Копьев ФТИ им. А.Ф.Иоффе, С.-Петербург ИФМ РАН, Н.Новгород 3.Ф. Красильник Г.Я. Красников ОАО «НИИМЭ и Микрон», Москва Ю.Г. Кусраев ФТИ им. А.Ф.Иоффе, С.-Петербург И.Г. Неизвестный ИФП СО РАН, Новосибирск В.Н. Овсюк ИФП СО РАН, Новосибирск А.А. Орликовский ФТИ РАН, Москва В.Я. Панченко РФФИ. Москва В.Я. Принц ИФП СО РАН, Новосибирск Минобрнауки РФ, Москва С.В. Салихов ИАПУ ДВО РАН, Владивосток А.А. Саранин А.Н. Сауров ИНМ РАН, Москва Н.Н. Сибельдин ФИАН им. П.Н.Лебедева, Москва Ф.Ф. Сизов ИФП НАН Украины, Киев ФТИ им. А.Ф. Иоффе, С.-Петербург Р.А. Сурис ИФП СО РАН, Новосибирск А.С. Терехов ИФТТ РАН, Черноголовка В.Б. Тимофеев В.В. Устинов ИФМ УрО РАН, Екатеринбург Новосибирский филиал ИФП СО РАН «КТИ В.Н. Федоринин ПМ» А.М. Филачев ОАО «НПО Орион», Москва А.В. Хлунов РНФ, Москва МГУ, Москва Д.Р. Хохлов

A.B. Чаплик Ю.А. Чаплыгин С.А. Чижик В.И. Шашкин M.R. Baklanov G.M. Gusev Alex Ignatiev S. Studenikin ИФП СО РАН, Новосибирск МИЭТ, Москва НАН Беларуси, Минск ИФМ РАН, Нижний Новгород IMEC, Belgium University of Sao Paulo, Brasil University of Houston, USA National Research Council, Canada

Адреса и контакты Программного комитета

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им.А.В.Ржанова СО РАН проспект академика Лаврентьева, 13 г. Новосибирск, 630090

Тысченко Ида Евгеньевна – ученый секретарь Программного комитета Электронная почта: tys@isp.nsc.ru

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Со-председатели А.В. Двуреченский М.М. Котюков Ученый секретарь А.В. Каламейцев А.В. Аникеев В.В. Атучин И.И. Бетеров В.Н. Брудный В.В. Бузук В.В. Васильев В.А. Гайслер С.А. Дворецкий П.Т. Девяткин Д.Г. Есаев К.С. Журавлев И.В. Ивонин Л.А. Ильина О.А. Клименко К.В. Павский А.С. Паршин А.Г. Паулиш А.Г. Погосов В.П. Попов Н.В. Пустовой Н.Н. Рубцова И.И. Рябиев Э.В. Скубневский А.И. Торопов М.П. Федорук

ИФП СО РАН, новосибирск ФАНО РФ, Москва

ИФП СО РАН, Новосибирск

Президиум СО РАН, Новосибирск ИФП СО РАН, Новосибирск ИФП СО РАН, Новосибирск ТГУ, Томск Новосибирский филиал ИФП СО РАН «КТИ ПМ» ИФП СО РАН, Новосибирск НГТУ, Новосибирск ИФП СО РАН, Новосибирск ИФП СО РАН, Новосибирск ИФП СО РАН, Новосибирск ИФП СО РАН, Новосибирск ТГУ, Томск ИФП СО РАН, Новосибирск Президиум СО РАН, Новосибирск ИФП СО РАН, Новосибирск СибГАУ им. М.Ф.Решетнева, Красноярск Новосибирский филиал ИФП СО РАН «КТИ ПМ» НГУ, Новосибирск ИФП СО РАН, Новосибирск НГТУ, Новосибирск ИФП СО РАН, Новосибирск ИФП СО РАН, Новосибирск ИФП СО РАН, Новосибирск ИФП СО РАН, Новосибирск НГУ, Новосибирск

Содержание

ШКОЛА МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ ПО АКТУАЛЬНЫМ ПРОБЛЕМАМ ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР

<u>1-е заседание</u>

Б.Г. Вайнер. Высокоточная тепловизионная диагностика полупроводниковых структур. 12

2-е заседание

И.И. Рябцев, И.И. Бетеров, Д.Б. Третьяков, В.М. Энтин, Е.А. Якшина. **13** Спектроскопия холодных ридберговских атомов для применений в квантовой информатике.

И.В. Антонова. Вертикальные гетероструктуры на основе графена. 14

НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО АКТУАЛЬНЫМ ПРОБЛЕМАМ ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР

<u>1-е заседание</u>

А.А. Саранин. Управление структурой спин-расщепленных электронных **15** состояний в двумерных сплавах на поверхности полупроводников.

<u>М.В. Якунин</u>, В.В. Устинов, С.А. Дворецкий, Н.Н. Михайлов. Спиновые эффекты и экспериментальные проявления сложного энергетического спектра в гетероструктурах HgTe/CdHgTe.

<u>Д.А. Свинцов</u>, В.И. Рыжий, А. Satou, Т. Otsuji, В. Вьюрков, А.А. Орликовский. Межзонное усиление и внутризонное поглощение терагерцового излучения в графене в условиях инверсной заселенности.

Д.В. Брунев, В.С. Варавин, В.В. Васильев, С.А. Дворецкий, И.В. Марчишин,
В.Д. Кузьмин, Н.Н. Михайлов, И.О. Парм, А.В. Предеин, И.В. Сабинина,
А.О. Сусляков, Г.Ю. Сидоров, Ю.Г. Сидоров, М.В. Якушев, К.К. Свиташев,
В.Н. Овсюк, А.Л. Асеев, А.В. Латышев. Инфракрасные фотоприемники на
основе оптимизированных гетероэпитаксиальных структур теллурида кадмия и ртути, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

<u>2-е заседание</u>

<u>А.М. Филачев</u>, И.Д. Бурлаков, В.П. Пономаренко. Фотонные приемники излучения и фоточувствительные материалы - основа развития ИК-техники.

В.И. Гавриленко. Гетероструктуры на основе HgTe/CdTe для лазеров дальнего ИК диапазона. **22**

<u>А.Е. Маричев</u>, Р.В. Лёвин, Б.В. Пушный. Разработка технологии изготовления фотоприемников лазерного излучения на основе твердых растворов GaInPAs.

<u>3-е заседание</u>

<u>А.Г. Милехин</u>, Л.Л. Свешникова, Т.А. Дуда, Е.Е. Родякина, В.М. Джаган, Е. **24** Шеремет, А.В. Латышев, Д.Р.Т. Цан. Резонансное гигантское комбинационное рассеяние света оптическими фононами в нанокристаллах CdSe на массивах нанокластеров Au.

Sefer Bora Lisesivdin. Implementation of Simple Parallel Conduction Extraction 25 Method (SPCEM) for separating 2D and 3D Conduction Channels in Semiconductor Structures.

<u>4-е заседание</u>

<u>А.А. Шевырин</u>, А.Г. Погосов, М.В. Буданцев, А.К. Бакаров, А.И. Торопов, **26** С.В. Ишуткин, Е.В. Шестериков. Аномальное квантование кондактанса подвешенного баллистического микроконтакта.

М.С. Жолудев. Эффекты асимметрии элементарной ячейки в узкозонных 27 квантовых ямах HgTe/CdHgTe.

<u>А.А. Лямкина</u>, С.П. Мощенко. Перенос энергии в ансамбле самоорганизованных квантовых точек через плазмонные моды. **28**

<u>Н.А. Небогатикова</u>, И.В. Антонова, В.Я. Принц, И.И. Куркина, Г.Н. Александров, В.Б. Тимофеев, С.А. Смагулова. Создание диэлектрических пленок фторографена методом химической функционализации графеновой суспензии.

<u>А.Ю. Игуменов</u>, А.С. Паршин, Ю.Л. Михлин, О.П. Пчеляков, А.И. Никифоров, В.А. Тимофеев. Тонкая структура спектров сечения неупругого рассеяния электронов Si.

<u>М.Д. Шарков</u>, М.Е. Бойко, А.В. Бобыль, А.М. Бойко, С.Г. Конников. Определение химического состава, формы и размеров зерен в арсениде-селениде галлия методом прикраевого МУРР. **31**

<u>5-е заседание</u>

<u>Ю.Г. Сидоров</u>, А.П. Анциферов, В.С. Варавин, С.А. Дворецкий, Н.Н. Михайлов, М.В. Якушев, И.В. Сабинина, В.Г. Ремесник, Д.Г. Икусов, И.Н. Ужаков, Г.Ю. Сидоров, В.Д. Кузьмин, С.В. Рыхлицкий, В.А. Швец, А.С. Мардежов, Е.В. Спесивцев, А.К. Гутаковский, А.В. Латышев, К.К. Свиташев. Молекулярно-лучевая эпитаксия CdxHg1-xTe на альтернативных подложках.

<u>В.А. Зиновьев</u>, А.В. Двуреченский, П.А. Кучинская, В.А. Армбристер, С.А. **34** *Тийс, А.А. Шкляев, А.К. Гутаковский, А.В. Мудрый.* Самоорганизация упорядоченных групп SiGe квантовых точек. *А.А. Шкляев.* Формы морфологий поверхности слоёв германия, полученных **35** при высоких температурах на кремнии.

<u>В.П. Попов</u>, А.К. Гутаковский, Л.Н. Сафронов, С.Н. Подлесный, В.А. Антонов, И.Н. Куприянов, Ю.Н. Пальянов, С. Рубанов. Совершенные гетероструктуры алмаз-графит-алмаз: получение, электронные и оптические свойства.

<u>Д.С. Абрамкин</u>, А.К. Бакаров, А.И. Торопов, А.К. Гутаковский, Т.С. Шамирзаев. Квантовые точки, сформированные в гетеросистеме InSb/AlAs.

H.X. Талипов, <u>А.В. Войцеховский</u>. О механизме формирования n+/n-/p **38** структур при ионной имплантации CdxHg1-xTe p-типа.

<u>6-е заседание</u>

<u>В.А. Гайслер</u>, А.В. Гайслер, И.А. Деребезов, А.С. Ярошевич, А.К. Бакаров, **39** Д.В. Дмитриев, А.К. Калагин, А.И. Торопов, М.М. Качанова, Ю.А. Живодков, Т.А. Гаврилова, А.С. Медведев, Л.А. Ненашева, В.М. Шаяхметов, О.И. Семенова, К.В. Грачев и др. Сверхминиатюрные излучатели на основе полупроводниковых квантовых ям и квантовых точек.

<u>А.Э. Климов</u>, И.Г. Неизвестный, В.Н. Шумский. Эпитаксиальные пленки **40** твердого раствора PbSnTe:In для приемников сверхдальнего ИК и терагерцового диапазонов.

<u>А.П. Ковчавцев</u>, В.М. Базовкин, А.А. Гузев, Н.А. Валишева, И.И. Ли, В.Г. Половинкин, В.М. Ефимов, А.В. Царенко, З.В. Панова, И.В. Мжельский, А.Е. Настовьяк. Приборы на основе гибридных InAs (InSb) ПЗИ фотоприемников.

<u>В.Л. Курочкин</u>, А.В. Зверев, И.И. Рябцев, И.Г. Неизвестный. Распределение 42 однофотонного квантового ключа по оптоволокну и открытому пространству.

<u>Е.А. Емельянов</u>, А.А. Ковалёв, В.В. Преображенский, М.А. Путято, Н.Н. **43** Рубцова, Б.Р. Семягин, Н.В. Кулешов, В.Э. Кисель, А.С. Руденков. Зеркала для пассивной синхронизации мод лазеров ближнего ИК диапазона на основе полупроводниковых наноструктур.

<u>7-е заседание</u>

<u>Н.С. Филиппов</u>, Д.В. Пышный, П.П. Лактионов, С.И. Романов. Аналитическая микро- и нанофлюидная система на основе кремниевых канальных матриц.

<u>В.А. Швец</u>, С.В. Рыхлицкий, Е.В. Спесивцев, В.Ю. Прокопьев, Ю.Г. Сидоров, **45** С.А. Дворецкий, Н.Н. Михайлов, М.В. Якушев. Эллипсометрический in situ контроль состава КРТ: проблемы, достижения и перспективы.

Стендовая секция

<u>А.П. Мелехов</u>, М.А. Алхимова, Г.С. Богданов, А. Бунин, И.О. Гончаров. Модификация свойств поверхности полупроводниковых материалов мягким рентгеновским излучением. **46**

<u>М.С. Аксенов</u>, А.Ю. Широков, О.Е. Терещенко, П.А. Половодов, Н.А. Валишева. Формирование границы раздела анодный оксид/InAs в газоразрядной плазме. 47 <u>П.Л.Новиков</u>, Ж.В.Смагина, А.В.Двуреченский. Исследование диффузии Ge 48 на структурированных подложках Si методом молекулярной динамики.

<u>О.В. Наумова</u>, А.И. Климовская, Ю.Н. Педченко, И.Г. Луцишин, Н.А. Высоцкая, А.В. Корсак, В.В. Лиходиевский, Ю.Б. Чайковский. Влияние физикохимических свойств поверхности нитевидных кристаллов кремния на генерацию нервных волокон.

Т.Е. Тимофеева, <u>П.В. Винокуров</u>, С.А. Смагулова. Расчет уровней перезарядки в гетероструктурах p-Si/SiGe/Si. **50**

<u>О.А. Ткаченко</u>, В.А. Ткаченко, О.Р. Sushkov. Полупроводниковый искусственный графен: дизайн, критический беспорядок и дираковские эффекты.

<u>С.В. Мутилин</u>, А.Б. Воробьёв, Р.А. Соотс, Д.Г. Икусов, Н.Н.Михайлов, **52** В.Я.Принц. Формирование проводящих микротрубок и гофрировок ZnTe/CdHgTe/HgTe/CdHgTe с двумерным электронно-дырочным газом в квантовой яме HgTe.

<u>К.А. Лозовой</u>, А.П. Коханенко, А.В. Войцеховский. Оценка вклада энергии **53** образования дополнительных ребер на изменение свободной энергии при росте квантовой точки.

И.В. Матюшкин. Транспортные процессы в наноразмерных кремниево- **54** кислородных системах.

<u>И.В. Матюшкин</u>, Н.В. Евстратов. Квантово-химические расчеты некоторых кремниево-кислородных кластеров вида Si_nO_m (m<2n, n<10). 55

<u>Ю.Э. Гребенькова</u>, И.С. Эдельман, А.Э. Соколов, В.И. Чичков, Н.В. Андреев. **56** Корреляция между оптическими и магнитооптическими свойствами тонких пленок La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ и Pr_{1-x}Sr_xMnO₃ с типом их проводимости.

<u>И.Е. Тысченко</u>, В.А. Володин, А.Г. Черков. Ускоренный рост нанокристаллов Ge в SiO₂ под действием гидростатического давления. **57**

<u>И.Е. Тысченко</u>, П. Грандэ, В.А. Володин, В.П. Попов. Ионно-лучевой синтез нанометровых слоев Ge на границе раздела Si/SiO₂ структур кремний-наизоляторе. **58**

<u>К.В. Феклистов</u>, Д.С. Абрамкин. Легирование кремния атомами эрбия методом имплантации вторичных ионов. **59**

Д.В. Номоконов. Магнетосопротивление анизотропного диска Корбино. 60

К.А. Конфедератова, Е.Е. Родякина. Коррекция эффекта близости при **61** формировании фотонных кристаллов методом электронно-лучевой лито-графии.

<u>Э.Г. Кулубаева</u>, О.В. Наумова, Б.И. Фомин, В.П. Попов. Подвижность электронов в нанометровых слоях КНИ в условии обогащении.

<u>Г.М. Борисов</u>, С.А. Кочубей, А.А. Ковалёв, Д.В. Ледовских, Н.Н. Рубцова, 63 В.В. Преображенский, М.А. Путято, Б.Р. Семягин. Генерация второй гармоники излучения инфракрасного фемтосекундного лазера в наноструктуре с асимметричными квантовыми ямами.

<u>И.И. Ижнин</u>, Е.И. Фицыч, А.В. Войцеховский, А.Г. Коротаев, С.А. Дворецкий, В.С. Варавин, Н.Н. Михайлов, М.В. Якушев, К.Д. Мынбаев. Донорный фон в эпитаксиальных структурах CdHgTe. *И.И. Ли.* Схемотехнические решения построения устройств считывания **65** сигналов для гибридных ИК ФПУ на основе ПЗИ элементов.

<u>Д.Г. Есаев</u>, А.И. Торопов, Н.А. Валишева. ИК фотоприемый модуль на основе многослойных гетероструктур GaAs/AlGaAs с квантовыми ямами. **66**

М.А. Демьяненко, <u>Д.Г. Есаев</u>, А.Г. Клименко, А.И. Козлов, И.В. Марчишин, А.Р. Новоселов, В.Н. Овсюк. Разработка технологии мозаичных неохлаждаемых микроболометрических приемников инфракрасного и терагерцового спектральных диапазонов форматом до 3072х576 и более.

М.А. Демьяненко, <u>Д.Г. Есаев</u>, А.И. Козлов, И.В. Марчишин, В.Н. Овсюк. Исследование влияния структуры кремниевого мультиплексора и параметров матрицы детекторов инфракрасного диапазона на характеристики фотоприемников.

<u>*Р.В. Левин, Д.Ю. Казанцев, Б.В. Пушный*</u>. Выращивание и исследование варизонных слоев твердых растворов на основе антимонида галлия. **69**

<u>В.Г. Кеслер</u>, А.А. Гузев, С.А. Дворецкий, Е.Р. Закиров, А.П. Ковчавцев, З.В. Панова, М.В. Якушев. МДП КРТ – фотодиод с туннельно прозрачным слоем окисла.

<u>С.Г. Бортников</u>, В.Ш. Алиев, И.В. Мжельский, И.А. Бадмаева. Осцилляции **71** тока в пленках диоксида ванадия как проявление пространственновременной нестабильности тока вблизи фазового перехода полупроводникметалл.

<u>В.А. Голяшов</u>, В.В. Преображенский, М.А. Путято, Б.Р. Семягин, Д.В. **72** Дмитриев, А.И. Торопов, М.С. Аксенов, Н.А. Валишева, И.П. Просвирин, А.В. Калинкин, В.И. Бухтияров, А.В. Бакулин, С.Е. Кулькова, О.Е. Терещенко. Гетероструктуры HfO₂/Si/GaAs(001) для оптических спин-детекторов.

<u>О.А. Шегай</u>, О.Р. Баютова, А.К. Бакаров. Фотопроводимость 2DEG **73** AlGaAs/GaAs мезатруктур зигзагообразной формы.

<u>*Н.Д. Абросимова, А.Г. Гаранин, М.Н. Минеев.* Влияние стационарного рентгеновского излучения на свойства границы сращивания структур «кремний на изоляторе» со скрытым диэлектриком, модифицированным имплантацией ионов примеси.</u>

<u>А.В. Никонов</u>, К.О. Болтарь, И.Д. Бурлаков, Н.И. Яковлева. Исследование **75** спектральных характеристик многослойных гетероэпитаксиальных структур КРТ.

<u>А.А.Блошкин</u>, А.И.Якимов, В.А.Тимофеев, А.В.Двуреченский, А.А.Кирокасян. **76** Процесс захвата дырок в гетероструктурах Ge/Si с квантовыми точками Ge. *E. Kutlu, P. Narin, G. Atmaca, B. Sarikavak Lisesivdin, S. B. Lisesivdin.* Ab initio study of oxygen and arsenic impurities on non-linear optical properties of β -Si3N4 material.

<u>К.Д.Мынбаев</u>, И.И.Ижнин, А.И.Ижнин, Н.Л.Баженов, А.В. Шиляев, **78** *Н.Н.Михайлов*, В.С.Варавин, М.В.Якушев, С.А.Дворецкий. Фотолюминесцентное исследование акцепторных состояний в гетероэпитаксиальных структурах CdHgTe, выращенных молекулярно-лучевой эпитаксией на подложках Si и GaAs.

<u>А.В. Войцеховский</u>, С.Н. Несмелов, С.М. Дзядух, В.В. Васильев, В.С. Варавин, С.А. Дворецкий, Н.Н. Михайлов, М.В. Якушев, В.Д. Кузьмин, В.Г. Ремесник, Ю.Г. Сидоров. Электрофизическая диагностика параметров МДПструктур на основе гетероэпитаксиального HgCdTe, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

<u>Ю.С. Воробьёва</u>, А.Б. Воробьёв, В.Я. Принц, А.И. Торопов, D. Maude. Магнитотранспорт в двумерном электронном газе на поверхности спирали в квантующих магнитных полях.

<u>А.В. Войцеховский</u>, Д.И. Горн. Фотолюминесценция в МКЯ-структурах КРТ **81** МЛЭ.

<u>В.В. Румянцев</u>, С.В. Морозов, А.В. Антонов, Д.И. Курицын, К.Е. Кудрявцев, А.М. Кадыков, В.И. Гавриленко, Н.Н. Михайлов, С.А. Дворецкий. Длинноволновая фотолюминесценция в узкозонных эпитаксиальных пленках и структурах с квантовыми ямами на основе HgCdTe.

<u>С.С. Березуева</u>, В.Н. Горошко, Б.М. Симонов, С.П. Тимошенков. Надёжностные параметры кольцевого микрогироскопа с кремниевым резонатором. **83**

<u>С.А. Смагулова</u>, Г.Н. Александров, П.В. Винокуров, И.И. Куркина, **84** И.В.Антонова. Исследование структурных, оптических и электрических свойств частично восстановленных оксид графеновых пленок.

Авторский указатель.	85

Author index

88

Высокоточная тепловизионная диагностика

полупроводниковых структур

Б.Г. Вайнер

Институт физики полупроводников им. А.В.Ржанова СО РАН, г. Новосибирск 630090, г. Новосибирск, пр-т Ак. Лаврентьева, 13 тел: (383) 330-7781, факс: (383) 333-2771, эл. почта: <u>BGV@isp.nsc.ru</u>

Обзорный доклад посвящен применению современного матричного тепловидения В диагностике И научном исследовании разнообразных полупроводниковых исходных готовых структур ОТ слитков ДО полупроводниковых приборов. Доклад основан на оригинальных результатах, полученных в ИФП СО РАН (г. Новосибирск) с использованием разработанных в этом же институте тепловизионных систем с охлаждаемым инфракрасным детектором на основе InAs.

Узкая полоса спектральной чувствительности таких детекторов (2.45–3.05 мкм) обеспечивает высокую информативность при диагностике прогиба и неплоскостности полупроводниковых шайб, а также при дефектоскопии многослойных полупроводниковых структур, полученных методом прямого сращивания, в частности, структур типа КНИ [1]. Продемонстрированы разнообразные примеры образцов с внутренними (скрытыми) дефектами, где система содержит как прозрачные для ИК излучения, так и непрозрачные (сильнолегированные) слои.

Отдельное место в докладе уделено исследованию готовых приборов силовой микроэлектроники (планарные высоковольтные диоды, тиристоры) [2]. Показано, что с помощью матричного тепловизора можно с высоким пространственным разрешением выявить локализацию слабых для электрического пробоя и утечек мест в приборе, проследить эволюцию развития дефектообразования на слабых участках, определить роль краевых эффектов.

Специальный цикл исследований посвящен тепловизионному изучению микро- и наноканальных кремниевых структур, образцов со слоями пористого кремния, свободных полупроводниковых микроканальных мембран [3]. Для получения результатов таких исследований была разработана специальная оригинальная технология, позволяющая с высокой чувствительностью и быстродействием проводить синхронно тепловизионные и эллипсометрические измерения.

- 1. B.G.Vainer, G.N.Kamaev, G.L.Kurishev // J. Cryst. Growth, vol. 210, No.1–3, 2000, pp. 351–355.
- B.G.Vainer, G.N.Kamaev // In: QIRT10: Proc. 10-th edition of the Quantitative Infrared Thermography/ Intern. Conf. July 27-30, 2010, Quebec City (Canada)/ X.P.V. Maldague, Ed. – Canada: Universite Laval, 2010, pp. 229–234.
- Б.Г.Вайнер, А.А.Гузев, К.П.Могильников, С.И.Романов, В.А.Швец // В сб.: Наука и образование в жизни современного общества: сб. науч. тр. по мат-лам Межд. науч.-практ. конф. 29.11.2013 г.: Ч. 12 ; М-во обр. и науки РФ. Тамбов: Изд-во ТРОО «Бизнес-Наука-Общество», 2013, с. 20–21.

Спектроскопия холодных ридберговских атомов для применений в квантовой информатике

<u>И.И. Рябцев</u>^{1,2)}, И.И. Бетеров¹⁾, Д.Б. Третьяков¹⁾, В.М. Энтин¹⁾, Е.А. Якшина^{1,2)}

¹ Институт физики полупроводников им. А.В.Ржанова СО РАН, Новосибирск, 630090, Пр. Лаврентьева, 13

² Российский квантовый центр, Сколково, 143025, Московская обл. тел: (383) 333-2408, факс: (383) 333-2771, эл. почта: <u>ryabtsev@isp.nsc.ru</u>

Атомы в высоковозбужденных (ридберговских) состояниях обладают рядом уникальных свойств, делающих их привлекательными для применений в квантовой информатике [1,2]. Это большие дипольные моменты, времена жизни и поляризуемости, а также сильные дальнодействующие взаимодействия между ридберговскими атомами. Экспериментальные методы лазерного охлаждения и прецизионной спектроскопии позволяют захватывать и манипулировать отдельными ридберговскими атомами и применять их для практической реализации квантовых операций над кубитами квантового компьютера на основе нейтральных атомов в оптических ловушках.

В докладе будет представлен обзор экспериментальных и теоретических работ, выполняемых в Институте физики полупроводников им. А.В.Ржанова СО РАН по лазерной и микроволновой спектроскопии холодных ридберговских атомов Rb в магнитооптической ловушке. В частности, были исследованы статистика лазерного возбуждения и регистрации одиночных ридберговских оптических микроволновых атомов [3-5], спектры И переходов [5]. взаимодействие двух ридберговских атомов в электрическом поле [3,4] и усиление взаимодействий ридберговских атомов в радиочастотном поле. Также предложены новые идеи по трехфотонному лазерному возбуждению без эффектов Доплера и отдачи [6], детерминированному возбуждению чирпованными лазерными импульсами одиночных атомов в режиме дипольной блокады [7] и реализации квантовых операций над кубитами. переставленными мезоскопическими ансамблями с неизвестным числом атомов [8].

- 1. I.I. Ryabtsev et al., J. Phys. B 38, S421 (2005).
- 2. И.И. Рябцев и др., Вестник РАН 83, 606 (2013).
- 3. I.I. Ryabtsev et al., Phys. Rev. Lett. **104**, 073003 (2010).
- 4. I.I. Ryabtsev et al., Phys. Rev. A 82, 053409 (2010).
- 5. В.М. Энтин и др., ЖЭТФ **143**, 831 (2013).
- 6. I.I. Ryabtsev et al., Phys. Rev. A 84, 053409 (2011).
- 7. I.I. Beterov et al., Phys. Rev. A 84, 023413 (2011).
- 8. I.I. Beterov et al., Phys. Rev. A 88, 010303(R) (2013).

Вертикальные гетероструктуры на основе графена

И.В. Антонова

Институт физики полупроводников имА.В.Ржанова, 630090, пр. Лаврентьева, 13

В обзоре рассмотрены последние достижения в создании вертикальных гетероструктур на основе графена и монослоев других диэлектрических и полупроводниковых материалов, таких как гексагональный нитрид бора, дихалькогениды переходных металлов и др. Обсуждается значительный прогресс в данной области и огромные перспективы развития вертикальных гетероструктур для широкого спектра приложений, связанные, прежде всего, с пересмотром физических принципов построения, и работы приборных структур с использованием графена в сочетании с другими монослойными материалами.

В настоящее время создано и исследовано несколько типов таких гетероструктур, и продемонстрирован огромный потенциал развития данного направления. Использование монослойных материалов стимулирует развитие именно вертикального расположения различных функциональных слоев в приборных структурах в отличие от традиционного планарного подхода кремниевой электроники. Прежде всего, показано, что ограничение в использовании графена для создания транзисторов из-за отсутствия запрещенной зоны легко снимается благодаря конструктивным решениям. Первые созданные гетероструктуры включали в себя слои гексагонального нитрида бора (hBN) и графена. В последнее время начали появляться работы, посвященные гетероструктурам использующим слои дихалькогенидов переходных металлов (NbSe₂, MoS₂, WS₂, WSe₂, TaS₂ и др.). В докладе обсуждаются транзисторы, гетероструктуры для фотовольтаики с высоким внутренним квантовым выходом, комплементарные баристоры (элементы логики, инвертеры), проводится сравнение латеральных и вертикальных транзисторов на основе графена и др. Также, обсуждается разработанный нами подход к созданию гетероструктур, основанный на использовании мультиграфена толщиной несколько нанометров, интеркаляции и химической функционализаци. Такой подход позволяет создавать из нескольких монослоев графена определенные функциональные блоки для их использования в более сложных гетероструктурах. Полученные приборные структуры демонстрируют неожиданные и интересные свойства, что значительно расширяет перспективы применения графена и других монослойных материалов. Дальнейший прогресс данного направления опирается, с одной стороны, на разработку новых и более сложных гетероструктур и, с другой стороны, на монослойных материалов и многослойных развитие методов получения гетероструктур. Пока для сборки используется механический перенос слоев, в дальнейшем развитие методов роста (синтеза) требуемых многослойных гетероструктур обеспечит переход к реальному их использованию. В целом, в настоящее время происходит пересмотр принципов организации различных приборных структур на основе графена и других монослойных материалов.

Управление структурой спин-расщепленных электронных состояний в двумерных сплавах на поверхности полупроводников

А.А. Саранин^{1,2, *}

¹ Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, 690041 ² Школа естественных наук, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, 690950 *saranin@iacp.dvo.ru

Для использования эффекта Рашбы [1] в двумерном электронном газе на поверхности кремния в спиновом транспорте необходимо иметь спинрасщепленные *металлические* поверхностные зоны. К сожалению, элементы с сильным спин-орбитальным взаимодействием, например Bi, Tl, Sb, Pt, Pb, образуют поверхностные реконструкции на кремния, которые, не обладают *металлическим* характером [2-5]. В настоящей работе предлагается подход для создания металлических спин-расщепленных зон с помощью увеличения плотности атомов в двумерном слое. Увеличение плотности атомов достигается с помощью добавления второго адсорбата. Данная стратегия хорошо зарекомендовала себя при модификации реконструкции Bi/Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ с помощью атомов Na и Tl/Si(111)1×1 с помощью Pb, что открывает новые возможности для создания новых *металлических* низкоразмерных материалов на кремнии с различной спиновой текстурой.

В настоящей работе с помощью сканирующей туннельной микроскопии, фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением и теоретических расчетов из первых принципов исследованы атомная, электронная и спиновая структуры двумерных сплавов Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Bi, Na и Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Tl, Pb.

На Рисунке 1 (левая панель) приведены основные структурные и электронные свойства исходной поверхности Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Bi. В этой реконструкции имеется 1 МС (монослой, 7.8×10¹⁴ сm⁻²) атомов Bi, которые образуют тримеры центрированные в положении T₄ на объмно-подобной поверхности Si(111)[7]. Основной особенностью электронной структуры этой поверхности является наличие спинрасщепленных неметаллических зон, обозначенных S1 (S1') [2].

Напыление 0.33 МС Na при комнатной температуре приводит к формированию двумерного, упорядоченного сплава Bi-Na структурные и электронные свойства которого показаны на Рисунке 1 (правая панель). Сравнение атомной структуры сплава со структурой исходной поверхности показывает, что на ней также на исходной поверхности присутствуют триммеры Ві. Размер этих триммеров на 8% больше, чем на исходной поверхности (длина связи Ві-Ві изменяется с 3.13 до 3.34 Å), а их угол поворота составляет $\pm 6.8^{\circ}$. В результате атомы Bi образуют сотовую сетку связанных триммеров с атомом Na, занимающим положение Т₄ в центре каждой шестиугольной ячейки. Изменение атомной структуры отражается и в изменении зонной структуры, что ясно видно из результатов исследования этой поверхности, полученных с помощью фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением и теоретических расчетов. Заметим, что эти данные находятся в прекрасном соответствии друг с другом, что указывает на достоверность предложенной модели сплава Bi-Na. Наиболее существенная особенность зонной структуры сплава Bi-Na, состоит в том, что в ней появляются металлические спин-расщепленные зоны, обозначенные Σ и Σ'. Взаимодействие атомов Pb с поверхностью Si(111) 1×1-Tl также приводит к формированию двумерного сплава $Si(111)\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Tl,Pb и спин-расшепленных металлических поверхностных зон.



Рисунок 1. Структурные и электронные свойства исходной поверхности Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Bi (левая панель) и двумерного сплава Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Bi,Na (правая панель). (a) и (e) 30×30 Å² CTM изображения, (b) и (f) структурные модели (атомы Bi показаны фиолетовым цветом, Na – зеленым и Si - серым). (c) и (g) Экспериментальные спектры, полученные с помощью фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением, (d) и (h) – теоретических расчетов. Размер зеленых кружков в расчетной зонной структуре соответствует величине поверхностного вклада.

Таким образом, приведенные примеры однозначно указывают путь для «превращения» исходной поверхности, имеющей полупроводниковые свойства, в поверхность, обладающую металлическими свойствами. Заметим, что обе исходные поверхности имеют покрытие адсорбата равное 1 МС, а так как постоянная решетки поверхности Si(111) составляет 3.84°Å, то плотность адсорбированных атомов слишком мала, для заметного перекрытия волновых функций их электронов. Добавление атомов второго адсорбата и увеличения суммарного покрытия до 4/3 МС приводит к уменьшению среднего расстояния между атомами в двумерном слое и формированию сплавов с *металлическими* свойствами.

- Y. Bychkov, E. Rashba // JETP Letters, 39, 78 (1984).
- K. Sakamoto et al. // PRL 103, 156801 (2009).
- K. Sakamoto et al. // PRL 102, 096805 (2009).
- X. Zhu et al. // Surf. Sci. 618, 115 (2013).
- J. Park et al. // PRL 110, 036801 (2013).
- R.H. Miwa, T.M. Schmidt, G.P. Srivastawa // J. Phys.: Cond. Matt. 15, 2441 (2003).

Спиновые эффекты и экспериментальные проявления сложного энергетического спектра в гетероструктурах HgTe/CdHgTe

<u>М.В. Якунин</u>¹⁾, В.В. Устинов¹⁾, А.В. Суслов²⁾, С.А. Дворецкий³⁾,

Н.Н. Михайлов³⁾

¹ ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, 620990, С. Ковалевской, 18 ² NHMFL, FSU, 1800 East Paul Dirac Drive, Tallahassee, Florida 32310, USA ³ ИФП СО РАН, Новосибирск, 630090, пр. Лаврентьева, 13 тел: (343) 378-3644, факс: (343) 374-5244, эл. почта: <u>yakunin@imp.uran.ru</u>

HgTe обладает уникальным инвертированным энергетическим спектром, и это свойство воспроизводится в квазидвумерных квантовых ямах HgTe шириной более 6.3 нм. Система электронов и дырок здесь существенно отличается от того, что имеет место в традиционных полупроводниковых гетероструктурах. Это отражается в больших спиновых расщеплениях уровней зоны проводимости, в перекрытии зон проводимости и валентной в достаточно широких слоях HgTe, в наличии особых топологически инвариантных состояний и др.

Мы представляем обзор результатов двух групп наших исследований магнитотранспорта в гетеросистеме HgTe/CdHgTe. Первая связана с эффектами спиновой поляризации электронов в квантовой яме HgTe [1,2], вторая – с особыми свойствами двойных квантовых ямах (ДКЯ) в данной гетеросистеме.

Из исследований осцилляций магнитосопротивления (MC) в наклонных магнитных полях выявлена определенная схема расположения точек закрытия щелей между спиновыми подуровнями на плоскости между перпендикулярной и параллельной слоям компонентами поля, показана связь этой схемы с эффектами



полной спиновой поляризации электронной системы (см. рисунок). В области квантового эффекта Холла в этих точках обнаружено необычное поведение МС с уменьшением ширины уровней, обусловленное связью между спиновой поляризацией электронного газа и понижением его обменной энергии.

Обнаружено сильное перекрытие зон проводимости и

валентной в ДКЯ со слоями HgTe и показана возможность регулировать его с помощью перпендикулярного слоям электрического поля. Выявлены существующие у вершины валентной зоны тяжелые электроны. Обнаружено необычное возвратное знакопеременное поведение коэффициента Холла.

- 1. M.V.Yakunin et al. // Phys. Rev. B. 2012. V.85. 245321.
- 2. M.V.Yakunin et al. // Physica E. 2010. V.42, P.948-951.

Межзонное усиление и внутризонное поглощение терагерцового излучения в графене в условиях инверсной населенности

<u>Д.А. Свинцов</u>¹, В.И. Рыжий², А. Satou², Т. Otsuji², В.В. Вьюрков¹, А.А. Орликовский¹

 ¹ Физико-технологический институт РАН,117218, Москва, Нахимовский просп.,36/1, эл. почта <u>svintcov.da@mipt.ru</u>
 ² Research Institute for Electrical Communication, Tohoku University, Sendai 980-8577, Japan

Графен является бесщелевым полупроводником и поэтому представляет интерес как материал для создания детекторов и источников излучения терагерцового (ТГц) диапазона. В работах [1,2] были предложены конструкции лазеров на графене с оптической и электрической накачкой. Усиление ТГцизлучения оптически накачанным графеном наблюдалось экспериментально [3]. Одной из важнейших проблем полупроводниковых ТГЦ-лазеров является внутризонное поглощение излучения, которое конкурирует с межзонным усилением в условиях инверсной населенности. В данной работе мы изучаем неизбежный механизм поглощения фотонов в графене, связанный с рассеянием носителей заряда друг на друге.

В полупроводниках с параболическим законом дисперсии электронэлектронные столкновения не приводят ни к возникновению электрического сопротивления, ни к поглощению света, что связано с сохранением тока частиц при столкновении. Благодаря линейной дисперсии носителей, столкновение электронов в графене сопровождается изменением тока частиц. Следовательно, электрон в графене может поглотить фотон и передать остаток энергии импульса и энергии другому носителю (электрону или дырке). Соответствующий коэффициент поглощения вычисляется в данной работе с помощью двух подходов: 1) правила Ферми для вероятности процесса «поглощение фотона + рассеяние» 2) вариационного решения кинетического уравнения с учетом коэффициент межчастичных столкновений. Рассчитанный поглощения пропорционален постоянной тонкой структуры $\alpha \approx 1/137$, квадрату константы связи в графене $\alpha_C = e^2 / \hbar v_0$ (v_0 - скорость безамсовых носителей), а также безразмерному интегралу, зависящему только от отношения энергии Ферми к температуре. Оба подхода дают результаты, «сшиваюшиеся» при промежуточных энергиях фотонов $\hbar\omega$, таких, что $\hbar\nu_{cc} < \hbar\omega < T$, где T - температура электрондырочной плазмы, а *v*_{cc} - частота межчастичных столкновений.

Нами показано, что в оптически или электрически накачанном графене поглощение света, связанное с межчастичным рассеянием имеет примерно такую же «силу», как поглощение, связанное с рассеянием на акустических фононах. При частотах более 5 ТГц полная динамическая проводимость накачанного графена может быть отрицательной, при меньших же частотах исследованный нами механизм поглощения доминирует над внутризонным усилением. Его величина может быть несколько уменьшена для графена на подложках с высокой диэлектрической проницаемостью или в структурах с затвором, что также исследовано в работе.

- 1. A. Dubinov et. al. // Appl. Phys. Express 2009 T. 2 C. 092301.
- 2. V. Ryzhii et. al. // J. Appl. Phys. 2011 T. 110 C. 094503.
- 3. S. Boubanga-Tombet et. al. // Phys. Rev. B 2012 T. 85 C 035443.

Инфракрасные фотоприемники на основе оптимизированных гетероэпитаксиальных структур теллурида кадмия и ртути, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии

Д.В. Брунев, В.С. Варавин, В.В. Васильев, С.А. Дворецкий, В.Д. Кузьмин, И.В. Марчишин, ,Н.Н. Михайлов, И.О.Парм, А.В. Предеин, И.В. Сабинина, А.О. Сусляков, Г.Ю. Сидоров, Ю.Г. Сидоров, М.В. Якушев, К.К. Свиташев, В.Н. Овсюк, А.Л. Асеев, А.В. Латышев

ИФП СО РАН, Новосибирск, 630090, проспект академика Лаврентьева 13 тел./факс: (383) 330-4967, эл. почта: <u>dvor@isp.nsc.ru</u>

Проведено рассмотрение различного дизайна гетероэпитаксиальных структур (ГЭС) теллурида кадмия и ртути ((КРТ), выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) для фотодиодных N+-р инфракрасных фотоприемников (ИК ФП). Проведенные расчеты позволили оптимизировать параметры ГЭС КРТ МЛЭ для изготовления различных ИК ФП. Варизонные функцию широкозонными слои выполняют пассивации поверхности поглощающего слоя, что обеспечивает средние значения NETD ИК ФП формата 288×4 для спектрального диапазона 8-10 мкм до 9 мК. Средние значения NETD для ИК ФП формата 320×256 с шагом 30 мкм и 640×512 с шагом 25 мкм для спектрального диапазона 3-5 мкм составили менее 15 мК. Высокопроводящий высоколегированный широкозонный слой выполняет функцию снижения последовательного сопротивления и коротковолнового отрезающего фильтра, что обеспечивает среднее значения NETD ИК ФП формата формата 320×256 с шагом 30 мкм и 640×512 с шагом 25 мкм для спектрального диапазона 8-10 мкм менее 30 мК и отсутствие debiasing («бублика») эффекта. Высокочастотный ИК ФП для спектрального диапазона 8-10 мкм на основе ГЭС КРТ МЛЭ с узкозонным высокопроводящим слоем имеет предельные характеристики до частот 1 ГГц. Изотопные р-Р структуры обеспечивают работу ИК ФП при повышенных температурах. ИК ФП формата 128×128 показал характеристики для «идеальных» фотодиодов до температур 140 К. Двухслойные ГЭС КРТ МЛЭ с оптимальным барьером между поглощающими слоями обеспечивает чувствительность в спектральных диапазонах 3-5 и 8-11 мкм. Двухспектральный ИК ФП на основе таких структур показал параметры ограниченные фоновым излучением. Разработаны и изготовлены фотоприемные устройства.

Полупроводниковые фоточувствительные материалы - основа развития ИК-техники.

А.М. Филачев^{1,2}, <u>И.Д. Бурлаков</u>^{1,2}, В.П. Пономаренко^{1,3}

¹ ОАО «НПО «Орион», Москва, 111123, Шоссе Энтузиастов, 46/2 тел: (499) 374-4900, факс: (499) 373-6862, эл. почта: <u>orion@orion-ir.ru</u> ² МГТУ МИРЭА, Москва, 119454, просп. Вернадского, 78 ³ МФТИ (Государственный университет), г. Долгопрудный Московской области, 141700, Институтский пер., 9

На протяжении последних десятилетий инфракрасная техника играет ключевую роль в создании большинства современных видов оборонной техники и оказывает заметное влияние на развитие ряда ключевых отраслей промышленности. Без нее невозможно развитие таких важнейших научных направлений, как оптика, астрофизика, спектроскопия, термография, а также прикладных областей - тепловидения, теплопеленгации, лазерной локации, оптической связи и др.

Практически все успехи или неудачи мирового становления этих направлений тесно увязаны с научно-техническим уровнем оптического материаловедения. Особую роль играет материаловедение для фотосенсорики, где параметры исходного материала практически полностью определяют характеристики фотосенсорных систем.

Признанный в мире, как базовый, перечень современных фоточувствительных материалов (ФМ) содержит примерно 15 наименований. Сюда относятся моноатомные полупроводники (Si и Ge), бинарные и соединения (InSb, InAs), тройные и даже четверные твердые растворы (CdHgTe, InGaAs,AlGaN, InGaAsSb и др.). Этот набор материалов позволяет перекрыть всю практически значимую область оптического спектра: от ультрафиолетовой до дальней инфракрасной, решая задачи дальнометрии, теплопеленгации, получения изображений в ночное время, обнаружения ракетных пусков и др. На развитии современных технологий этих материалов и организации их промышленного производства в стране были направлены мероприятия ФЦП-2 по направлению «Материалы для оптики, ото- и фотоэлектроники, лазерной техники. В результате на новом технологическом уровне было создано отечественное производство ряда важнейших материалов. В первую очередь сюда относятся: эпитаксиальные гетероструктуры InP-InGaAs для систем ночного видения, авиационной дальнометрии и др.; жидкофазные гетероструктуры CdHgTe/CdZnTe для тепловидения в дальней и средневолновой областях спектра; германии монокристаллический, как для ИК-оптики, так и для фотосенсорики и некоторые другие критически важные соединения и материалы. Это позволило в 2012-2014 гг. успешно решить такие задачи, как развитие фотосенсорики для космической метеорологии, фотосенсорики для тепловизионных панорамных приборов и др. Так, на основе созданного материала были изготовлены многоспектральные фотосенсорные комплексы, успешно прошедшие испытания на КА. Всего же по оптическому материаловедению было разработано с выпуском ТУ более 137 остродефицитных и импортозамещающих материалов.

Не менее существенной ожидается роль будущего нового этапа программы. Здесь предполагается создать ряд принципиально новых, совершенных материалов ИК-техники нового поколения, существенно облегчив решение задач импортозамещения, повышения конкурентоспособности и т.п.

Одновременно в новом этапе программы возрастает роль фундаментальных исследований в области кристаллохимии и кинетики роста сложных полупроводниковых соединений. Так должна быть построена целостная модель молекулярно-лучевого синтеза ртутьсодержащих твердых растворов, полностью установлены механизмы дефектообразования. Необходимо установить строение оптимальной гетероструктуры, включая подложку большого диаметра, при выращивании твердых растворов. Это позволит существенно поднять процент выхода годных изделий на основе такого материала и подойти к созданию технологии мегапиксельных фотоприемных устройств ИК-диапазона для важнейших оборонных и общегражданских задач.

С учетом основополагающей роли новых материалов в инновационном развитии промышленности необходимо рекомендовать материаловедение для включения в число приоритетных направлений развития науки Российской Федерации.

Гетероструктуры на основе HgTe/CdTe для лазеров дальнего ИК диапазона

В.И. Гавриленко

Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, 603950, ГСП-105 тел: (831) 417-9462, факс: (831) 417-9464, эл. почта<u>:gavr@ipmras.ru</u>

Гетероструктуры с квантовыми ямами (КЯ) на основе HgTe/CdTe в настоящее время привлекают большой интерес исследователей во всем мире. В зависимости от ширины квантовой ямы в них может реализовываться как нормальная (в узких КЯ), так и инвертированная зонная структура. При критической ширине КЯ (d_c ~ 6,3 нм) ширина запрещенной зоны обращается в нуль и носители заряда являются безмассовыми дираковскими фермионами. Структуры с КЯ с инвертированным зонным спектром являются 2Dтопологическими изоляторами [1]. В асимметричных инвертированных КЯ наблюдается гигантское (до 30 мэВ) спиновое расщепление Рашбы [2]. В широких (d > 13 нм) КЯ HgTe имеет место перекрытие зон и может реализовываться состояние 2D полуметалла [3]. Малая ширина запрещенной зоны методы длинноволновой ИК/ТГц спектроскопии естественным делает инструментарием для изучения зонной структуры материала

В первой доклада будет дан обзор исследований зонной структуры материала методами магнитопоглощения (в полях до 50 Тл) и фотопроводимости (ФП) в дальнем ИК диапазоне. Во второй части будут представлены результаты исследований спектров и кинетики релаксации ФП и фотолюминесценции (ФЛ) при импульсном оптическом возбуждении. Наблюдение межзонной ФЛ в дальнем ИК (до 26 мкм), большие (несколько мкс) времена релаксации неравновесных носителей [4,5] указывают на возможность создания на основе КЯ НgTe лазеров диапазона 20-60 мкм, где квантовые каскадные лазеры на основе материалов АЗВ5 не работают из-за сильного двухфононного поглощения [6]. Еще в 60-80-ые годы были созданы межзонные инжекционные лазеры этого диапазона (до 46 мкм) на основе узкозонных материалов PbSnSe(Te), где вследствие «зеркальной симметрии» законов дисперсии электронов и дырок подавлена межзонная ожерекомбинация [7]. Симметрия законов дисперсии электронов и дырок может быть обеспечена и в КЯ НgTe с нормальной зонной структурой. Будут представлены дизайны волноводных структур с КЯ HgTe, результаты расчетов коэффициентов усиления для различных участков длинноволнового ИК излучения.

- 1. M.König et al. // Science. 2007. V.318. P.766
- 2. К.Е.Спирин и др. // Письма ЖЭТФ. 2010. Т.92, вып.1. С.65-68.
- 3. З.Д.Квон и др. // Письма в ЖЭТФ. 2008. Т.87, вып.9. С.588-591.
- 4. S.V. Morozov et al. // Appl. Phys. Lett. 2014. V.104. 072102.
- 5. S.V. Morozov et al. // Appl. Phys. Lett. 2014 (submitted).
- 6. B.S.Williams. // Nature Photonics. 2007. V.1. P.517.
- 7. И.И.Засавицкий. // Труды ФИАН. 1993. Т.224, С. 3-118.

Разработка технологии изготовления фотоприемников лазерного излучения на основе твердых растворов GaInAsP

<u>А.Е. Маричев^{1,2}</u>, Р.В. Лёвин¹, Б.В. Пушный¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26 ² СПб ГЭТУ, Санкт-Петербург, 197376, Профессора Попова, 5 тел: (812) 297-5169, эл. почта: <u>segregate1@yandex.ru</u>

Появление лазеров (оптических квантовых генераторов) способствовало становлению и интенсивному развитию нового научного направления – переда энергии на расстояние(информации). Для этих целей необходимы эффективные Наиболее перспективными являются фотоприемники. фотоэлектрические преобразователи для мошного лазерного излучения с длиной волны в диапазоне 1.06 мкм, которое "попадает" в локальный минимум потерь поглощения земной атмосферы, а лазеры обладают большой мощностью до 10кВт и узкой диаграммой направлености [1]. При преобразовании узкополосного излучения необходимы приборы принципиально отличающиеся от других полупроводниковых преобразователей из-за того, что лазерное излучение является монохроматичным, обладает пространственной когерентностью и узкой диаграммой направленности. Одна из этих проблем связана с "эффектом насыщения" преобразования носителей в материале фотоприемника, при больших мощностях облучения. Для фотоприемников такого излучения необходимо материалы с прямой структурой зон, с кристаллическим использовать совершенством и высокой подвижностью генерированных носителей, наиболее подходящим материалом является твердый раствор типа GaInAsP.

В данной работе сообщается о результатах разработки технологии изготовления и исследования фотоприемников на основе эпитаксиальных слоёв InGaAsP с Eg~1.1-1.15эB(λ = 1064 нм) выращенных методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОС ГФЭ).

Рост структур на основе твердых растворов GaInAsP с шириной запрещенной зоны Eg~1.1-1.17эВ проходил при температуре Tp=600 °C и давлении P=100 мбар, на подложках InP. В качестве газа носителя применялся водород(H2), очищенный в палладиевом фильтре, с точкой росы не хуже -100°C, общий поток водорода был равен -Fc = 5 л/мин.

Были оптимизированы режимы роста, такие как: отношения потоков элементов V и III групп, скорость роста. Определены оптимальные уровни легирующих примесей n и р типа. Слои GaInAsP согласованны по постоянной решетки с постоянной решетки подложки InP, что было подтверждено исследованием рентгенодифракционного анализа. Полученные слои GaInAsP имели интенсивную фотолюминесценцию.

На основе полученных структур были изготовлены лабораторные образцы фотоприемников мощного лазерного излучения с эффективностью более 50%

Литература

[1] Principles of Lasers and Optics. William S. C. Chang, 2005.

Резонансное гигантское комбинационное рассеяние света оптическими фононами в нанокристаллах CdSe на массивах нанокластеров Au

<u>А.Г. Милехин</u>^{1,2)}, Л.Л. Свешникова¹⁾, Т.А. Дуда¹⁾, Е.Е. Родякина^{1,2)},

В.М. Джаган^{3,4)}, Е. Шеремет⁴⁾, А.В. Латышев^{1,2)}, Д.Р.Т.Цан⁴⁾

¹ ИФП СО РАН, Новосибирск, 630090, Лаврентьева, 13 ² НГУ, Новосибирск, 630090, Пирогова, 2

³ Technische Universität Chemnitz, D-09107, Chemnitz, Germany тел: (383) 316-6054, факс: (383) 333-2771, эл. почта: <u>milekhin@isp.nsc.ru</u>

Гигантское комбинационное рассеяние света (ГКРС) позволяет на несколько порядков усилить сигнал КРС нанокристаллов (НК) и, таким образом, изучать их фононный спектр. Мы представляем результаты исследования микро-ГКРС оптическими фононами одного монослоя коллоидных НК CdSe, сформированного помощью технологии Ленгмюра- Блоджетт (ЛБ) на поверхности массивов нанокластеров нанокластеров Au разного диаметра. Массивы нанокластеров Au были сформированы на поверхности Si с помощью нанолитографии. Структурные параметры НК и нанокластеров Au определялись с помощью сканирующей электронной микроскопии.

Спектры микро-КРС НК CdSe на поверхности Si проявляют лишь особенность, соответствующую моде оптического фонона Si (Рис.1а). Однако в спектрах КРС НК, нанесенных на поверхность массивов нанокластеров Au, возникает ряд пиков на частотах, кратных 207.5 cm⁻¹, что соответствует модам LO фононов в НК CdSe и их обертонам (Fig.1a). Появление новых особенностей свидетельствует о наблюдении эффекта ГКРС фононами НК CdSe. Интенсивность сигнала ГКРС зависит от размера нанокластеров Au и демонстрирует резонансный характер с максимальным усилением (относительно сигнала КРС) не менее $2x10^3$ для нанокластеров диаметром 77 нм (Рис.1б). Энергия локализованного поверхностного плазмона в нанокластерах Au такого размера, определенная нами из экспериментов по микро-эллипсометрии, соответствует энергии межзонных переходов в НК и энергии возбуждения лазера и свидетельствует о реализации резонансного ГКРС.



Рисунок1. а)- Спектры КРС, измеренные при 632.8 нм, от НК CdSe, нанесенных на 1- поверхность Si, 2- массивы нанокластеров Au. b)- Интенсивность сигнала ГКРС оптическими фононами НК CdSe для массивов нанокластеров Au с периодом 150, 200 и 350 нм.

Implementation of Simple Parallel Conduction Extraction Method (SPCEM) for separating 2D and 3D Conduction Channels in Semiconductor Structures

Sefer Bora Lisesivdin

Gazi University, Faculty of Science, Department of Physics, 06500 Teknikokullar Ankara, Turkey.

<u>bora@gazi.edu.tr</u>

Simple parallel conduction extraction method (SPCEM) is one of the many methods used to extract parallel conduction channels in a semiconductor structure. All other methods use magnetic field dependent data for separating different carriers in a structure. Contrary to these methods, SPCEM uses few simple acceptations for magnetic field dependent conductivity tensor components, which concludes possibility to use single magnetic field data to extract one two-dimensional and one threedimensional carriers in the structure. In this presentation, SPCEM implementation in GaN-based heterostructures and other different structures are presented. SPCEM results usage in different types of analyses; i.e. electron temperature calculation, conductivity analysis, more accurate scattering analyses are presented in details.

Acknowledgements: This work is supported by TUBITAK under Project No 113F364.

Аномальное квантование кондактанса подвешенного баллистического микроконтакта

<u>А. А. Шевырин</u>¹⁾, А. Г. Погосов^{1,2)}, М. В. Буданцев¹⁾_А. К. Бакаров^{1,2)}, А. И. Торопов¹⁾, С. В. Ишуткин³⁾, Е. В. Шестериков³⁾

¹ Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, 630090, ак. Ржанова, 2

² Новосибирский государственный университет, 630090, Пирогова, 2 ² Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634055, Ленина, 40

тел: (383) 333-1087, факс: (383) 333-1087, эл. почта: shevandrey@isp.nsc.ru

Электронный транспорт в квантовых точечных контактах остается предметом активного исследования. Большинство современных работ, относящихся к этой тематике, посвящено физической природе универсальной особенности, наблюдающейся на затворных характеристиках при значениях кондактанса, близких

к $0,7 \times 2e^2/h$ (так называемой «0,7-аномалии» [1]). Несмотря на отсутствие общепринятой теории, консенсусом существующих моделей является тот факт, что «0,7-аномалия» не может быть объяснена в рамках одночастичного подхода и связана с взаимодействием между электронами. В этом контексте особый интерес вызывают системы с сильным электрон-электронным взаимодейс-твием.

Изученные в настоящей работе квантовые точечные контакты представляют собой такие системы, созданные на основе оторванных от подложки (подвешенных) тонких проводящих мембран с двумерным электронным газом в гетероструктуре GaAs/AlGaAs. Усиления электрон-электронного взаимодействия в подвешенном квантовом точечном контакте можно было ожидать, поскольку электрическое поле зарядов ограничивается внутри мембраны, обладающей высокой диэлектри-ческой проницаемостью. Было обнаружено, что при подвешивании баллистического микроконтакта сохраняяется квантование кондактанса, а аномалии кван-



а) квантование кондактанса неподвешенного квантового точечного контакта (на вставке изображен экспериментальный образец); б) отсутствие «0,7-аномалии» до подвешивания; в) проявление «0,7аномалии» после подвешивания.

тования, включая «0,7-аномалию», становятся значительно более выраженными. Полученные результаты подтвер-ждают теоретические представления о связи «0,7-аномалии» с электрон-электрон-ным взаимодействием.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №№ 13-02-01153, 12-02-00532_а.

Литература

1. A. P. Micolich, J. Phys.: Condens. Matter. 23, 443201 (2011).

Эффекты асимметрии элементарной ячейки в узкозонных квантовых ямах HgTe/CdHgTe

М. С. Жолудев

ИФМ РАН, Нижний Новгород, 607680, Академическая 7 тел: (831) 417-9482 +261, факс: (831) 417-9464, эл. почта: <u>zholudev@ipmras.ru</u>

Отсутствие центра инверсии в элементарной ячейке HgTe и CdTe приводит к качественным изменениям энергетического спектра электронов в узкозонных квантовых ямах на основе этих материалов. Примером является антипересечение нижнего уровня Ландау зоны проводимости и верхнего уровня Ландау валентной зоны в квантовых ямах HgTe/CdHgTe с инвертированной зонной структурой [1, 2, 3], о котором свидетельствует расщепление одной [1, 2] или двух [4] линий магнитопоглощения.

В данной работе проведено теоретическое исследование влияния асимметрии элементарной ячейки на энергетический спектр и волновые функции электронов в квантовых ямах HgTe/CdHgTe с различной кристаллографической ориентацией.

Рассчитана зонная структура квантовых ям HgTe/CdHgTe в отсутствие магнитного поля. Показано, что в бесщелевой квантовой яме, выращенной на плоскости (013), имеются две точки касания зон с графеноподобным законом дисперсии, смещённые в направлении (03-1). Проведена оценка величины расщепления линий циклотронного резонанса в слабых магнитных полях в зависимости от ширины ямы и концентрации носителей.

В квантующих магнитных полях вычислена величина расщепления при антипересечении уровней Ландау в квантовых ямах с инвертированной зонной структурой для различных кристаллографических ориентаций и ширины ямы.

Расчёты проводились в рамках приближения огибающих функций с эффективным гамильтонианом 8х8 (четырёхзонное приближение) с учётом встроенной деформации. Асимметрия элементарной ячейки описывалась членами второго порядка по k в блоках Г6×Г8 и Г6×Г7.

Литература

[1] M. Orlita, K. Masztalerz, C. Faugeras et al., Phys. Rev. B 83, 115307 (2011).

[2] M. Zholudev, F. Teppe, M. Orlita et al., Phys. Rev. B 86, 205420 (2012).

[3] M. Pang and X. G. Wu, Phys. Rev. B 88, 235309 (2013).

[4] М. С. Жолудев, F. Терре, М. Orlita и др., Труды XVIII Международного симпозиума «Нанофизика и наноэлектроника» **2**, 473 (2014).

Перенос энергии в ансамбле самоорганизованных квантовых точек через плазмонные моды

А.А. Лямкина, С.П. Мощенко

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова, Новосибирск, 630090, пр. Лаврентьева 13 тел: (383) 330-6945, факс: (383) 330-6945, эл. почта: <u>lyamkina@isp.nsc.ru</u>

Коллективные моды, которые могут возникать в системах сильно взаимодействующих квантовых излучателей, представляют собой новый интересный способ хранить и передавать информацию в квантовой информатике [1]. Существование сверх- и субизлучательных состояний для ансамбля двухуровневых систем, взаимодействующих через обмен фотонами, было предсказано в знаменитой работе Дике [2] и экспериментально подтверждено для атомных газов. Реализация сверхизлучения для других квантовых излучателей, таких как квантовые точки (КТ), затруднена из-за слабых взаимодействий между КТ в типичных самоорганизованных системах. В недавней теоретической работе [3] был предложен новый тип взаимодействия между излучателями за счёт переноса возбуждения через плазмонные моды в металлической частице, расположенной рядом ансамблем излучателей. с В данной работе экспериментально исследована гибридная металл-полупроводниковая система с InAs/AlGaAs KT, расположенными под кластерами индия.

молекулярно-лучевой Методом эпитаксии нами были выращены структуры, содержащие слой InAs КТ в матрице AlGaAs, полученных в режиме роста Странского-Крастанова, и кластеры In на поверхности. Для сравнения был также выращена реперная структура без капель. В спектре ФЛ образца с каплями наряду с широкой линией от массива КТ с максимумом 1040 нм присутствует более узкий пик с максимумом 1170 нм, в то время как спектр реперного образца содержит только линию КТ. Наличие этого узкого пика можно объяснить с помощью переноса энергии между КТ, расположенными под кластером In, посредством возбуждения и поглощения локализованных плазмонов в этом кластере по механизму, описанному в [3]. При этом за счёт сильного взаимодействия плазмона с экситоном крупной КТ, находящейся ближе всего к кластеру металла, перенос происходит преимущественно в эту крупную точкуакцептор. Это приводит к усилению ФЛ в виде узкого пика в длинноволновой части спектра, которое наблюдается нами экспериментально. Таким образом, в данной работе обнаружено экситон-плазмонное взаимодействие в системе, состоящей из InAs/AlGaAs КТ и индиевых кластеров, которое приводит к переносу энергии в подансамбле КТ, расположенных под кластером.

ААЛ выражает благодарность за предоставление финансовой поддержки в виде стипендии Президента РФ СП-805.2013.3.

- 1. D. Petrosyan and G. Kurizki // Phys. Rev. Lett. 2002. V.89, p. 207902.
- 2. R.H. Dicke // Phys. Rev. 1954. V. 93, p. 99.
- 3. V.N. Pustovit et al. // Phys. Rev. B. 2013. V. 88, p. 245427.

Создание диэлектрических пленок фторографена методом химической функционализации

<u>Н.А. Небогатикова</u>¹⁾, И.В. Антонова¹⁾, В.Я. Принц¹⁾, И.И. Куркина²⁾, Г.Н. Александров²⁾, В.Б. Тимофеев²⁾, С.А Смагулова²⁾

¹Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН 630090, г. Новосибирск, просп. академика Лаврентьева, 13 ²Северо-восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова 677000, г. Якутск, ул. Белинского, д.58 тел: (383) 333-0699, эл. почта: nadonebo@gmail.com

Графен является перспективным материалом с набором таких свойств как высокие электро- и теплопроводность, механическая гибкость и прозрачность. Однако наличие нулевой запрещенной зоны в его энергетическом спектре существенно ограничивает возможные области его применения. В настоящее время в связи с развитием графеновых технологии ведется активное изучение материалов на основе графена. Фторографен является наиболее термически стойким материалом в ряду таких диэлектриков как оксид графена, гидрированный и фторированный графен. Однако из-за технологической сложности процесса фторирования ему не было уделено достаточно внимания.

Целью данной работы было получение однородных диэлектрических пленок фторографена большой площади из суспензии графита с относительно крупными графитовыми частицами (толщина 10 нм – 1 мкм, латеральный размер 500 нм – 1.5 мкм), подвергнутой процессу обработки в водном растворе плавиковой кислоты. Методика фторирования была разработана нами ранее для пленок поликристаллического графена [1, 2].

Были получены пленки фторографена с разной степенью фторирования и показана возможность уменьшения всех размеров частиц графита в суспензии при варьировании продолжительности обработки ее в водном растворе плавиковой кислоты. Получены тонкие (до 20 нм), однородные изолирующие пленки. Методами сканирующей электронной микроскопии, рамановской спектроскопии и при помощи вольт-фарадных измерений получен ряд доказательств протекания реакции фторирования. Определены диэлектрическая проницаемость пленок (около 3) и максимальная напряженность электрического поля (~10⁶ B/см), которую выдерживают пленки. Механизм уменьшения всех размеров частиц графита в суспензии и фторирования частиц в водном растворе плавиковой кислоты также обсуждаются в докладе.

Литература

1. Н. А. Небогатикова и др. // Российские нанотехнологии. 2014. Т. 9, № 1-2. С. 59-65.

2. N. A. Nebogatikova et al. // Physica E. 2013. Vol. 52. P. 106-111.

Тонкая структура спектров сечения неупругого Рассеяния электронов Si

<u>А.Ю. Игуменов¹⁾</u>, А.С. Паршин¹⁾, Ю.Л. Михлин²⁾, О.П. Пчеляков³⁾, А.И. Никифоров³⁾, В.А. Тимофеев³⁾

¹Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф.Решетнева, Красноярск, 660014, проспект газеты Красноярский рабочий, 31 ²ИХХТ СО РАН, Красноярск, 660036, Академгородок, 50, стр. 24 ³ИФП им. А.В.Ржанова СО РАН, Новосибирск, 630090, просп. Академика Лаврентьева, 13 тел: (391) 291-92-57, факс: (391) 264-47-09, эл. почта: <u>info@sibsau.ru</u>

Спектры сечения неупругого рассеяния электронов (К λ -спектры, К – дифференциальное сечение неупругого рассеяния электронов, λ – средняя длина неупругого пробега электронов) могут быть использованы для исследования элементного состава [1], химического состояния и распределения элементов по толщине приповерхностного слоя [2].

Нами предложен метод детального анализа Кλ-спектров посредством моделирования экспериментальных спектров с помощью универсальных функций сечения неупругого рассеяния электронов Тоугаарда [3]. Количество пиков выбирается из условия максимального совпадения модельных и экспериментальных пиков потерь.

На рис. 1 представлен Кλ-спектр для Si, полученный при энергии первичных электронов 400 эВ. Модельные пики по энергетическим положе-





ниям соответствуют поверхностным возбуждениям S_1 , S_3 , S и объемным – E_2 , V [4]. Природа основных пиков подтверждена зависимостью площади модельных пиков от энергии первичных электронов: площадь поверхностных пиков (S, S_3) убывает с увеличением энергии, объемных (V) – возрастает.

Данная методика разложения Кλ-спектров на составляющие может быть использована для определения природы пиков потерь и расчета поверхностного параметра.

Литература

1. А.С.Паршин и др. // Письма в ЖТФ. 2008. Т.34, вып.9. С.41-48.

- 2. А.С.Паршин и др. // Автометрия. 2012. Т.48, вып.4. С.88-92.
- 3. S.Tougaard // Surf. Interface Anal. 1997. T.25. C.137-154.

4. В.Г.Лифшиц и др. Спектры ХПЭЭ поверхностных фаз на кремнии //Дальнаука. 2004. 315 с.

Определение химического состава, формы и размеров зерен в арсениде-селениде галлия методом прикраевого МУРР

М.Д. Шарков¹⁾, М.Е. Бойко¹⁾, А.В. Бобыль¹⁾, А.М. Бойко¹⁾, С.Г. Конников¹⁾

¹ Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26

тел: (812) 292-7985, факс: (812) 297-1017, эл. почта: mischar@mail.ru

На основе методики прикраевого малоуглового рассеяния рентгеновских лучей (МУРР) разработан способ, позволяющий при исследовании зернистых материалов устанавливать связь химического состава отдельных зерен (доменов, кластеров) с их размерами и формой. С помощью метода прикраевого МУРР исследован образец твердого раствора GaAs_{0.7}Se_{0.3}/GaAs – пленки, выращенной методом газофазной эпитаксии.

Измерены кривые МУРР от изучаемого образца при трех значениях длины волны пучка: 0.979 Å (незначительно короче К-края Se), 1.043 Å (незначительно короче К-края As), 1.54 Å (характеристическое Cu K_{a1} излучение). На Рис. 1 показана кривая МУРР от образца, зарегистрированная при Cu K_{a1} излучении.



Показано, что исследуемый образец GaAs_{0.7}Se_{0.3} распадается на отдельные домены GaAs и GaSe, имеющие форму пластин и располагающиеся параллельно поверхности подложки. Определено, что пластинчатые зерна GaAs и GaSe достигают размеров около 350 нм в направлениях, параллельных поверхности подложки, и образуют мозаичную структуру. Получена оценка размеров зерен GaAs и GaSe в направлении нормали

к поверхности подложки: около 25 нм для GaAs и около 15 нм для GaSe. Показано, что в составе зерен GaSe могут наблюдаться компоненты с линейной геометрией. Построена модель доменной структуры образца.

Молекулярно-лучевая эпитаксия Cd_xHg_{1-x}Te на альтернативных подложках

Ю.Г. Сидоров^а, А.П. Анциферов^а, В.С. Варавин^а, С.А. Дворецкий^а, Н.Н. Михайлов^а, М.В. Якушев^а, И.В. Сабинина^а, В.Г. Ремесник^а, Д.Г. Икусов^а, И.Н. Ужаков^а, Г.Ю. Сидоров^а, В.Д. Кузьмин^а, С.В. Рыхлицкий^а, В.А. Швец^а, А.С. Мардежов^а, Е.В. Спесивцев^а, А.К. Гутаковский^а, А.В. Латышев^а, К.К. Свиташев^а

^а Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук (ИФП СО РАН) 630090, Новосибирск,пр. Ак.Лаврентьева 13 ¹ sidorov@isp.nsc.ru

Рассмотрена кристаллохимическая модель гетероперехода $A^2B^6/GaAs$, основанная на анализе среднего числа валентных электронов на одну формульную единицу. Модель предсказывает, что образование в решетке с тетраэдрической координацией связей типа Ga-Se приводит к нарушению баланса валентных электронов в гетеропереходе. Стремление гетеросистемы устранить возникающий на гетерогранице избыток валентных электронов может приводить к фасетированию, двойникованию и нарушению стехиометрии растущей структуры. Экспериментально наблюдаемые механизмы формирования гетеропереходов $A^{II}B^{VI}/GaAs$ и $A^{II}B^{VI}/Si$ согласуются с выводами кристаллохимического рассмотрения - на гетерогранице ZnSe/GaAs имеет место фасетирование и двойникование. Установлено, что необходимым условием снижения дефектности гетерограницы является отсутствие паров элементов шестой группы при термической очистке подложки GaAs от окисла. Удовлетворение этого условия требует введения в состав установки специальной технологической камеры, в которой не производится распыление элементов шестой группы.

Требование высокой однородности состава слоев КРТ по площади совместно с требованием высокой точности задания состава вызывают необходимость создания специальной технологической оснастки камеры для выращивания КРТ и введения эллипсометрического контроля роста *in situ*. Создано отечественное автоматизированное производительное оборудование для выращивания гетероэпитаксиальных структур Cd_xHg_{1-x} Те методом молекулярно-лучевой эпитаксии (ГЭС МЛЭ КРТ) с контролем качества слоев в процессе выращивания в реальном масштабе времени и высокой однородностью состава КРТ по площади пластины.

В пленках КРТ, выращенных методом МЛЭ, наблюдаются характерные прорастающие дефекты. Поперечные размеры этих дефектов обычно увеличиваются с толщиной пленки $Cd_XHg_{1-X}Te$, напоминая латинскую букву V, поэтому эти прорастающие дефекты назвали V-дефектами (далее ПВД). Характерная плотность ПВД составляет 10^3 см⁻². Попадая в активную область фотоприемных элементов, эти дефекты могут ухудшать характеристики приборов. Причиной образования ПВД является то, что активность теллура в системе выращивания Cd_xHg_{1-X} те методом МЛЭ, как показывают термодинамические расчеты, достаточна для образования фазы элементарного теллура. Поэтому в неоптимальных условиях роста или при наличии на поверхности участков, на которых затруднена кристализация КРТ, теллур может накапливаться на поверхности и инициировать зарождение поликристаллических зерен Cd_XHg_{1-X} те методами атомно-силовой микроскопии (ACM) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) показали, что V-дефекты являются сложными образованиями, содержащими двойни-

ковые ламели (ДЛ), дефекты упаковки (ДУ) и области нарушенной структуры (НС) с повышенным содержанием теллура. В центральной области ПВД формируется рыхлое поликристаллическое образование с избытком теллура. Размеры ПВД определяются ДУ, разрастающимися по плоскостям {111}.

Разработан технологический процесс изготовления ГЭС КРТ МЛЭ, имеющий практически неограниченные возможности модифицирования параметров по толщине слоя КРТ и обеспечивающий производство ГЭС МЛЭ КРТ приборного качества. Выпущены Технические условия на ГЭС Cd_xHg₁. _xTe/CdTe/ZnTe/GaAs(301).

Самоорганизация упорядоченных групп SiGe квантовых точек

<u>В. А. Зиновьев</u>¹⁾, А.В. Двуреченский^{1), 2)}, П.А. Кучинская¹⁾, В. А. Армбристер¹⁾, С.А. Тийс¹⁾, А.А. Шкляев^{1), 2)}, А. К. Гутаковский¹⁾, А.В. Мудрый³⁾

¹ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российский академии наук, Новосибирск, 630090, пр. ак. Лаврентьева, 13

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090

³ ГНПО «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению», Минск, 220072, Белоруссия

тел: (383)333-2519, факс: (383) 333-2624, эл. почта: zinoviev@isp.nsc.ru

В настоящее время, группы туннельно-связанных полупроводниковых квантовых точек (КТ), упорядоченных в пространстве, считаются наиболее перспективными объектами для создания на их основе приборов нового поколения, работа которых будет основана на законах и принципах квантовой механики. В данной работе развит подход к формированию упорядоченных групп наноостровков Ge (квантовых точек) при эпитаксии на поверхности гетероструктуры, представляющей собой подложку Si(100) с предварительно сформированными на ней затравками в виде SiGe нанодисков. Установлено, что наблюдаемое упорядоченное расположение наноостровков (рис.1) обусловлено анизотропным характером распределения энергии упругой деформации поверхности над затравочным SiGe нанодиском, а именно, существованием 4-х локальных минимумов энергии, упорядоченно расположенных относительно центра затравки. С увеличением толщины закрывающего Si слоя, осаждённого поверх затравок, наноостровки в группах сближаются, и их характерный размер уменьшается. Обнаружено, что при толщинах закрывающего слоя Si более 30 нм



упорядоченное расположение КТ в пределах группы исчезает, но влияние затравочных областей прослеживается через зарождение и рост преимущественно парных КТ. Полученные данные подтверждают, что основным фактором, определяющим пространственную конфигурацию группы КТ, является распределение упругой деформации в приповерхностном слое над затравкой. На основе

Рис. 1 СТМ - снимок упорядоченных групп КТ

предложенного подхода выращены многослойные структуры с вертикальносовмешёнными группами KT. Оптические И структурные свойства упорядоченных SiGe КТ исследовались с помощью методов фотолюминесценции, просвечивающей электронной микроскопии, рентгеновской дифракции и спектроскопии комбинационного рассеяния света. Авторы выражают благодарность В. А. Володину за исследование образцов методом спектроскопии КРС. Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 13-02-12105, 14-02-90036).

Формы морфологий поверхности слоёв германия, полученных при высоких температурах на кремнии

А.А.Шкляев

Институт физики полупроводников им.А.В.Ржанова СО РАН, Новосибирск, 630090, пр. Ак. Лаврентьева, 13

тел: 8 913 001 0085, эл. почта: shklyaev@isp.nsc.ru

Слои германия на кремнии обычно изучаются до толщин 2-3 нм. Из-за сложности получения изображений поверхностей, имеющих развитый рельеф нанометрового масштаба при осаждении бо́льших покрытий, работы по их исследованию практически не проводятся. Другими мало изученными направлениями являются, как рост слоёв германия на кремнии, так и их отжиги при температурах значительно выше 500 °C. Это связано с тем, что при высоких температурах происходит модификация слоёв, обусловленная действием целого комплекса физических процессов, включая перемешивание атомов германия и кремния, введение и движение дислокаций несоответствия, значительного массопереноса, вызванного релаксацией упругих напряжений и минимизацией поверхностной энергии.

Нами используются сканирующая туннельная микроскопия и растровая электронная микроскопия (РЭМ) для изучения морфологии поверхностей, полученных в результате роста или отжига при температурах выше 700 °C слоёв германия толщиной до 100 нм на чистых и оксидированных поверхностях кремния. Слои выращиваются осаждением с использованием молекулярного пучка германия. Экспериментальные результаты, полученные нами при более низких температурах, опубликованы в [1,2].

На рисунке представлено РЭМ-изображение, как один из примеров образующейся морфологии поверхности. Для её получения германий номинальной толщины 80 нм осаждался на поверхность Si(111) при 460 °C. Затем образец отжигался при 850 °C в течение 20 мин. В результате отжига морфология поверхно-



сти в виде сложного нерегулярного рельефа, сформированного сравнительно пологими фасетирующими плоскостями, трансформировалась в сеть зигзагообразных гребней с атомно-плоскими участками поверхности между ними. Изменение морфологии поверхности при отжигах вызвано релаксацией упругих напряжений, несмотря на то, что при этом происходит значительное увеличение общей площади поверхности в результате формирования «кру-

тых» фасетирующих плоскостей на боковых сторонах гребней. Рост и отжиги слоёв германия на кремнии при высоких температурах приводят к образованию целого ряда новых форм морфологии поверхности в виде отдельных островков, сетки непрерывных гребней, узоров рекристаллизации, а также атомно-гладких сплошных тонких слоёв. Слои германия на кремнии с такой морфологией поверхности могут обладать модифицированными физическими свойствами и служить основой для изготовления новых гетеро- и наноструктур Ge/Si.

Литература

1. A.A. Shklyaev, K.N.Romanyuk, A.V.Latyshev // JSEMAT. 2013. V.3. P.195-204.

2. A.A. Shklyaev, K.N.Romanyuk, S.S.Kosolobov // Surf. Sci. 2014. V.625. P.50-56.

Совершенные гетероструктуры алмаз-графит-алмаз: получение, электронные и оптические свойства

В.П. Попов¹⁾, А.К. Гутаковский¹⁾, Л.Н. Сафронов¹⁾, С.Н. Подлесный¹⁾,

В. А. Антонов¹⁾, И.Н. Куприянов²⁾, Ю.Н. Пальянов²⁾, С. Рубанов³⁾

¹ Институт физики полупроводников им. А.В.Ржанова, ² Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева, Новосибирск, 630090, Россия ³ Университет Мельбурна, Мельбурн, Австралия тел: (383) 333-2493, факс: (383) 333-2771, эл. почта: <u>popov@isp.nsc.ru</u>

В (111) пластинах алмаза, имплантированных ионами H_2^+ с энергией 50 кэВ флюенсами 3x10¹⁶ - 3x10¹⁷ см⁻², исследован процесс отжига нарушений при высоких Р-Т параметрах (1200°С, 3-7 ГПа). При флюенсах выше критического (5x10¹⁶ см⁻²) для графитизации заглубленного слоя с имплантированным водородом происходила графитизация нарушенного слоя, также как и при аналогичном отжиге в вакууме [1]. Однако, в отличие от отжига в вакууме после облучения флюенсами 5х10¹⁶ при отжиге с давлением Р<4.5 ГПа (ниже Р-Т кривой фазового равновесия графит-алмаз) в имплантированном слое растет гетероэпитаксиальный слой графита с преимущественной ориентацией (001), а при гидростатическом отжиге с давлением P>5 ГПа идет твердофазная эпитаксиальная рекристаллизация (ТФЭР) аморфизированного слоя. Водород при графитизации распределяется равномерно в 50 нм заглубленном слое по данным ВИМС, а в процессе ТФЭР его профиль практически не изменяется. Это означает, что диффузия водорода в аморфном слое и его сегрегация на границе ТФЭР отсутствует из-за преобладающей sp3 гибридизации C-C связей. С увеличением флюенса ионов $H_2^+ > 5.3 \times 10^{16}$ см⁻² область стабильности решетки алмаза уменьшается в сторону больших давлений, хотя согласно недавним теоретическим расчетам рост концентрации водорода должен приводить к неустойчивости графитовой фазы по отношению к алмазной решетке вплоть до спонтанного перехода графита в алмаз [2,3].

Механизмы электронного транспорта и оптические свойства всех слоёв и мембран толщиной 30-300 нм на различных подложках подтвердили, что отжиг монокристаллического алмаза при высоких Р-Т параметрах после имплантации водорода позволяет формировать совершенные гетероэпитаксиальные структуры алмаз-графит–алмаз при давлениях, соответствующих области стабильности фазы графита. Твердофазная рекристаллизации алмаза наблюдается только в слоях с низким содержанием водорода, что не соответствует расчетным данным [2,3].

Литература

1. V. P. Popov, L. N. Safronov, O. V. Naumova, et al // Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. B, 2012, 282, C.100–107.

2. A.G. Kvashnin, et al. // J. Phys. Chem. Lett. 2014, 5, pp. 541–548.

3. G. Kvashnin, L.A. Chernozatonskii, B.I. Yakobson, and P.B. Sorokin // Nano Letters, 2014, 14 (2), pp. 676–681.
Квантовые точки, сформированные в гетеросистеме InSb/AlAs

Д.С. Абрамкин, А.К. Бакаров, А.И. Торопов, А.К. Гутаковский, Т.С. Шамирзаев

Институт физики полупроводников СО РАН им. А.В. Ржанова, Новосибирск, 630090, пр. ак. Лаврентьева, 13 тел: (383) 330-6945, эл. почта: <u>demid@isp.nsc.ru</u>

Теоретические расчёты [1] показывают, что в гетеросистеме InSb/AlAs могут формироваться структуры с энергетическим спектром первого рода и непрямой запрещённой зоной. Разделение носителей заряда в пространстве квазиимпульсов приводит к увеличению времени жизни экситона вплоть до ~ 100 мкс. Подобные структуры перспективны с точки зрения исследования динамики долгоживущих локализованных экситонов, в частности спиновой релаксации экситонов в квантовой точке (КТ) [2].

Гетероструктуры выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках GaAs ориентации (100). На буферном слое GaAs выращивался слой AlAs толщиной 50 нм при температуре подложки 620°C. Затем рост прекращался и температура подложки снижалась до 450°C. Остывание поверхности AlAs проводилось в условиях избытка As (структура A) и в условиях избытка Sb (структура B). КТ формировались в режиме атомно-слоевой эпитаксии: осаждался In в количестве, эквивалентном 0.5 монослоя, затем, в течение 15 с осаждалась Sb. Данные операции повторялись 3 раза. После формирования КТ заращивались слоем AlAs толщиной 50 нм, который защищался от окисления слоем GaAs.

Исследования строения полученных структур, проведенные методом просвечивающей электронной микроскопии, показывают, что сформировавшиеся псевдоморфно напряжены. КΤ Принимая BO внимание значительное рассогласование параметров решётки InSb и AlAs (12.6%), формирование напряжённых КТ указывает на то, что они состоят из твёрдого раствора InAlSbAs. энергетического проведены расчёты спектра напряжённых КТ Были InAlSbAs/AlAs. Расчёты показывают, что в зависимости от содержания Sb в составе твёрдого раствора, КТ могут иметь структуру, как первого, так и второго рода. Эксперимент подтверждает результаты расчётов. Структура А, с меньшим содержанием Sb в КТ, демонстрирует характер интенсивностной зависимости спектров фотолюминесценции (ФЛ), присущий системам первого рода, а структура В, с большим содержанием Sb – системам второго рода [3]. Длительная (~100 мкс) кинетика затухания ФЛ КТ первого рода указывает на разделение носителей заряда в пространстве квазиимпульсов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 13-02-00073 и 14-02-31102), фонда некоммерческих программ «Династия», стипендиальной программы Президента РФ (грант № СП-985.2013.5) и программы Министерства Образовании и Науки РФ (контракт № 16.552.11.7091).

- 1. Т. С. Шамирзаев, ФТП 45, 97 (2011);
- 2. D. Dunker, et. at., Appl. Phys. Lett. 101, 142108 (2012);
- 3. N. N. Ledentsov, et. at., Phys. Rev. B 52, 14058 (1995).

О механизме формирования *n⁺-n⁻-р* структур при ионной имплантации Cd_xHg_{1-x}Te *p*-типа

Н. Х. Талипов¹, А. В. Войцеховский²

¹ Военная академия РВСН им. Петра Великого, Китайгородский пр., 9, Москва, 109074. тел: (926)246-5396, эл. почта: <u>niyazt@yandex.ru</u>

² Томский государственный университет, ул. Ленина, 36, Томск, 634050

Известно, что постимплантационный отжиг при температуре T=200 ⁰C в течение 40 мин имплантированного ионами B^+ Cd_xHg_{1-x}Te (KPT) *p*-типа приводит к формированию $n^+ - n^- - p$ структуры, как предполагается, за счет диффузии из нарушенной ионной бомбардировкой приповерхностной области смещенных атомов Hg [1]. Целью настоящей работы являлось экспериментальная проверка данной модели.

Эксперименты проводились на объемных кристаллах и гетероэпитаксиальных слоях *p*-КРТ (ГЭС КРТ МЛЭ) с исходной концентрацией дырок $p=5 \pm 0^{15}-1 \pm 0^{16}$ см⁻³ и их подвижностью $\mu_p=400-600$ см²·B⁻¹×⁻¹ при *T* =77 К. Состав объемного КРТ имел значение *x*=0,22. Состав ГЭС КРТ МЛЭ в рабочем слое составлял x=0,22-0,28, а в верхнем варизонном слое толщиной 0,4–1,5 мкм он варьировался от $x_s=0,22$ до 0,56. Имплантация ионов B⁺ проводилась при комнатной температуре в интервале энергий E=10-175 кэВ и доз $D=3\pm 0^{11}-1\pm 0^{15}$ см⁻². Облучение ионами Xe⁺ объемного *p*-КРТ с E = 135 кэВ дозами $D=1\pm 0^{12}-1\pm 0^{16}$ см⁻². Постимплантационные отжиги не проводились. Также использовались различные последовательности совместных процессов: 1) ионной имплантации B⁺ и отжига под анодным окислом (AO) при *T*=150 °С в течение 60 мин (пленка AO служит диффузионным источником атомов Hg [2]); 4) ионной имплантации B⁺ и ионно-лучевого травления (ИЛТ) ионами Ar⁺ (рис. 1).

На основе совокупности полученных экспериментальных данных, делается вывод, что формирование $n^+ - n^- - p$ структуры в процессе ионной имплантации в *p*-КРТ происходит вследствие миграции вглубь кристалла не захваченных на стоки подвижных донорных дефектов – междоузельных атомов Hg.



Рис. 1. Схема эксперимента (*a*) и распределение по глубине слоевой концентрации электронов N_s и концентрации *n* (*δ*) при различных последовательностях имплантации B⁺ и ИЛТ Ar⁺.

Литература

L.O.Bubulac, W.E.Tennant, D.S.Lo et all, J. Vac. Sci. Technol. A5, 3166 (I987).
 H.X.Талипов, В.П.Попов, В.Г.Ремесник, З.А.Налькина, ФТП 26, 310 (1992).

Сверхминиатюрные излучатели на основе полупроводниковых квантовых ям и квантовых точек

<u>В. А. Гайслер^{1,2)}</u>, А. В. Гайслер¹⁾, И. А. Деребезов¹⁾, А. С. Ярошевич¹⁾, А. К. Бакаров¹⁾, Д. В. Дмитриев¹⁾, А. К. Калагин¹⁾, А. И. Торопов¹⁾, М. М. Качанова¹⁾, Ю. А. Живодков¹⁾, Т. А. Гаврилова¹⁾, А. С. Медведев¹⁾, Л. А. Ненашева¹⁾, В. М. Шаяхметов¹⁾, О. И. Семенова¹⁾, К. В. Грачев¹⁾, В. К. Сандырев¹⁾, А. С. Кожухов¹⁾, Д. В. Щеглов¹⁾, Д. Б. Третьяков¹⁾,

И. И. Бетеров¹⁾, В. М. Энтин¹⁾, И. И. Рябцев¹⁾, А. В. Латышев¹⁾, А. Л. Асеев¹⁾

¹ Институт физики полупроводников СО РАН им. А.В. Ржанова, Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 13

² Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, 630073, пр. К. Маркса, 20

тел: (383)330-6945, факс: (383)330-6945, эл. почта: haisler@isp.nsc.ru

Сверхминиатюрные полупроводниковые излучатели – новая страница оптоэлектроники, открывающая перспективы создания высокопроизводительных информационных систем. систем квантовой криптографии, оптических миниатюрных эталонов оптической мощности и частоты. К числу таких излучателей следует отнести лазеры с вертикальным резонатором (ЛВР), а также излучатели одиночных фотонов (ИОФ) и излучатели фотонных пар (ИФП), запутанных по поляризации, которые представляют собой абсолютный предел миниатюризации светоизлучтелей. В докладе будут сформулированы принципы работы сверхминиатюрных полупроводниковых излучателей, приведены исследований характеристик излучателей, разработанных результаты И изготовленных в Институте физики полупроводников СО РАН им. А.В. Ржанова в течение последних пяти лет.

Будут представлены результаты разработки одномодовых лазеров с вертикальным резонатором на основе AlGaAs квантовых ям (КЯ) с длиной волны 795 нм, перспективных для использования в миниатюрных атомных стандартах частоты, работающих на переходах $5S_{1/2} \rightarrow 5P_{1/2}$ атомов Rb⁸⁷.

Будут приведены результаты разработки полностью полупроводникового брэгговского микрорезонатора для излучателей одиночных фотонов, сочетающего в себе токовую накачку селективно позиционированных InAs квантовых точек (КТ), высокую внешнюю квантовую эффективность (до 80%) и низкий уровень расходимости выходного излучения (NA ≤ 0.2), обеспечивающий высокую эффективность ввода излучения в стандартное оптоволокно.

Пары запутанных фотонов могут излучаться одиночными полупроводниковыми КТ в процессе каскадной рекомбинации биэкситона и экситона в случае, если экситонные состояния вырождены по энергии или же их расщепление ΔE_{FS} не превышает естественную ширину экситонных уровней Γ_X $=\hbar/\tau_X$, где τ_X – время жизни экситона. В докладе будут представлены результаты исследования тонкой структуры экситонных состояний InAs квантовых точек, выращенных на GaAs подложках с ориентацией (001) и (111). Будет показано, что структуры с КТ, выращенные по механизму Странского-Крастанова с малым временем прерывания роста на подложках GaAs (001), содержат субансамбли КТ, для которых выполняется условие $\Delta E_{FS} \approx \Gamma_X$, необходимое для генерации пар запутанных фотонов.

Эпитаксиальные пленки твердого раствора PbSnTe:In для приемников сверхдальнего ИК и терагерцового диапазонов

А.Э. Климов, И.Г. Неизвестный, В.Н. Шумский

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, 630090, пр. Ак. Лаврентьева, 13, тел.: (383) 330-6631, факс: (383) 333-2766, эл. почта: klimov@isp.nsc.ru

Представлены результаты исследований эпитаксиальных пленок твердых растворов PbSnTe, легированных индием [1]. Показано, что транспорт носителей заряда в PbSnTe: In в электрических полях более E~100 В/см определяется токами, ограниченными пространственным зарядом, при наличии в запрещенной зоне локализованных центров, играющих роль ловушек для электронов. На рисунке показана типичная вольтамперная характеристика (BAX), измеренная при T=4,2 К.



ВАХ структуры СОТ: In при T = 4,2 К. Измерения проводились с помощью электрометра В7-40 (1); Щ-300 (2); в импульсном режиме (3).

запрещенной зоне.

Развита технология МЛЭ нелегированных и легированных индием пленок твердых растворов PbSnTe на подложках BaF_2 и на кремнии с буферными слоями фторидов кальция и бария – Si/CaF₂/BaF₂ и технология создания гибридных фотоприемных устройств форматом 2x128, с МЭШ менее 10^{-18} Bt/Гц^{0,5} при температуре T=7 К. Изготовлен и исследован макет элемента устройства непрямого формирования изображения в субмиллиметровой области спектра.

Литература

1. Klimov A.E., Shumsky V.N. Ferroelectric-Phisical Effects , Edited by M. Lallart, Janeza Trdine 9, 51000 Rijeca, Croatia, 2011, 527-552.

Обнаружено влияние магнитного поля на сдвиг ВАХ по оси напряжений с изменением тока для напряжений, соответствующих началу полного заполнения локализованных центров в запрещенной зоне, в пределах до четырех порядков. Обнаружена ориентационная зависимость статической диэлектрической проницаемости от направления электрического поля.

Установлен преобладающий механизм рекомбинации в PbSnTe:In при гелиевых температурах, установлено, что долговременные релаксации связаны с перезарядкой локализованных центров в

Приборы на основе гибридных InAs (InSb) ПЗИ фотоприемников

А.П. Ковчавцев, В.М. Базовкин, А.А. Гузев, Н.А. Валишева, И.И. Ли,

В.Г. Половинкин, В.М. Ефимов, А.В. Царенко, З.В. Панова, И.В. Мжельский,

А.Е. Настовьяк

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13, эл. почта: <u>kap@isp.nsc.ru</u>

Комплексные исследования физико-химических свойств границы раздела, изучение электрофизических процессов в МДП-структурах при неравновесном импульсном обеднении, технологические достижения по созданию совершенной границы раздела InAs/сверхтонкий фторсодержащий анодный оксид с плотностью быстрых состояний $<3\cdot10^{10}$ см⁻²эВ⁻¹, позволили нам реализовать гибридные многоэлементные фотоприемные устройства (ФПУ) линейчатых и матричных типов в спектральном диапазоне 1-3 мкм (InAs) и 3-5 мкм (InSb) с предельно высокой обнаружительной способностью. На основе ФПУ создан ряд приборов ИК-техники: тепловизор "Свит" на InAs, инфракрасный сканирующий микроскоп с пространственным разрешением ~ 3 мкм, быстродействующие спектрометры на InAs и InSb со скоростью регистрации спектра ~ 5000 кадров/с [1-5].

На рис.1.показана зависимость величины NETD от эффективной кадровой



Рис.1. Экспериментальные зависимости температурног разрешения тепловизора от эффективной кадровой част ты, определяемой как 100 кадров с⁻¹/N, где N- количество кадров суммирования (температура сцены 30⁰ C).

частоты. Видно, что увеличение количества накопленных кадров не приводит к появлению избыточных шумов как самих чувствительных элементов, так и обрабатывающей электроники. При суммировании кадров температурное разрешение тепловизора достигает величины ~ 4 мК. Тепловизоры показали высокую эффективность в качестве диагностического оборудования в различных медицинских учреждениях а также при проведении научных исследований.

- 1. А.П. Ковчавцев, Г.Л.Курышев, и др. Фотоприемники зарядовой инжекции на арсениде индия, в кн. Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона. Новосибирск, 2001, с.10 118.
- 2. Г.Л. Курышев, А.П. Ковчавцев, Н.А. Валишева. ФТП, **35**(9), 1111 (2001).
- 3. А.П. Ковчавцев, НАУКА из первых рук, 47, 34 (2012).
- 4. И.И. Ли, В.М. Базовкин и др. // Автометрия, 2007, т.43, в. № 4, с. 25 35.
- 5. И.И. Ли, В.М. Базовкин и др. // Автометрия, 2007, т.43, в. № 4, с. 35 49.

Распределение однофотонного квантового ключа по оптоволокну и открытому пространству

<u>В.Л. Курочкин</u>¹, А.В. Зверев¹, И.И. Рябцев¹, И.Г.Неизвестный¹ ¹ Институт Физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, 630090, пр. ак. Лаврентьева, 13 тел: (383) 333-2488, факс: (812) 333-2771, эл. почта: <u>kurochkin@isp.nsc.ru</u>

Для создания однофотонных квантовых линий связи и исследования распределения квантового ключа через свободное пространство в Институте физики полупроводников СО РАН создана экспериментальная установка для генерации квантового ключа [1]. Передающий блок состоит из четырех полупроводниковых лазеров. Каждый лазер генерирует импульсы света с одной из четырех поляризаций 0^0 , 45^0 , 90^0 и -45^0 . Анализ поляризации фотонов в приемнике производится с помощью двух призм Глана и четырех однофотонных детекторов. Распределение квантового ключа осуществлялось по протоколу BB84 в двух альтернативных базисах, не ортогональных друг другу. При среднем числе фотонов в импульсе 0,1-0,4 и квантовой эффективности детекторов одиночных фотонов 30-40% была получена скорость генерации ключа 1,2-4,4 кбит/с с уровнем ошибок 1-2% [2].

Также создана экспериментальная оптоволоконная квантовая система связи на основе двухпроходной автокомпенсационной оптической схемы. Для распределения квантового ключа применяется метод фазового кодирования одиночных фотонов. Система состоит из передатчика и приемника, соединенных между собой одномодовым оптоволокном SMF-28 (квантовый канал) длиной 25-100 км [3]. С детекторами одиночных фотонов, созданными на основе коммерчески доступных лавинных InGaAs/InP фотодиодов ERM 547, реализовано распределение квантового ключа на расстояние 25 км [4]. Co сверхпроводниковыми детекторами дальность связи была увеличена до 101,7 км [5]. Рекордная на данный момент дальность распределения квантового ключа по км оптоволокну длиной 302,4 была продемонстрирована на основе поляризационного кодирования с применением малошумящих сверхпроводниковых детекторов [6].

- [1] В.Л. Курочкин, И.И. Рябцев, И.Г. Неизвестный, Оптика и спектроскопия 96, 772 (2004).
- [2] A.V. Kolyako, I.G. Neizvestny, V.L. Kurochkin, Journal of Physics: Conference Series, 2014 (in press).
- [3] В.Л. Курочкин, И.И. Рябцев, И.Г. Неизвестный, Микроэлектроника, 35, 41 (2006).
- [4] И.И. Рябцев, И.И. Бетеров, Д.Б. Третьяков, В.М. Энтин, В.Л. Курочкин, А.В. Зверев, И.Г. Неизвестный, Вестник Российской академии наук, **83**, 606 (2013).
- [5] V.L. Kurochkin, A.V. Zverev, Yu.V. Kurochkin, I.I. Ryabtsev, I.G. Neizvestny, R.V. Ozhegov, P.A. Larionov, G.N. Goltsman, Program of 2nd International Conference on Quantum Technologies ICQT-2013, 20–24 July 2013, Moscow, p.89.
- [6] R.V. Ozhegov, V.V. Kovalyuk, K.V. Smirnov, A.V. Divochiy, Yu.B. Vahtomin, M.S. Elezov, G.N. Goltsman, Yu. Kurochkin, V. Kurochkin, Open Systems & Information Dynamics, 2014 (in press).

Зеркала для пассивной синхронизации мод лазеров ближнего ИК диапазона на основе полупроводниковых наноструктур

<u>Е.А. Емельянов</u>¹⁾, А.А. Ковалёв¹⁾, В.В. Преображенский¹⁾, М.А. Путято¹⁾, Н.Н. Рубцова¹⁾, Б.Р. Семягин¹⁾, Н.В. Кулешов²⁾, В.Э. Кисель²⁾, А.С. Руденков²⁾

¹⁾Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, 630090, проспект Академика Лаврентьева,13

тел: (383) 333-1967, факс: (383) 333-2771, эл. почта: <u>e2a@isp.nsc.ru</u>

²⁾Белорусский Национальный технический университет, проспект Независимости 65, корп. 17, к. 208А, Минск 220013, Беларусь

Излучение в виде фемтосекундных импульсов находит применение в научных исследованиях, в медицине и биологии, при обработке различных материалов. Наиболее экономичным способом получения фемтосекундных импульсов излучения является режим пассивной синхронизации мод лазера, а наилучшим техническим решением для обеспечения этого режима являются полупроводниковые зеркала с насыщающимся поглощением.

Несмотря на имеющиеся коммерческие зеркала с насыщающимся поглощением, лучшие результаты достигаются путём проектирования зеркал с оптическими параметрами, соответствующими данному лазеру. Важнейшими параметрами являются: соответствие спектральной области и величины поглощения полупроводниковой наноструктуры спектру и величине усиления лазера, высокое оптическое качество и высокая отражательная способность в необходимом спектральном диапазоне. Для миниатюрных лазеров с высокой частотой следования импульсов излучения важно обеспечить определённую кинетику восстановления отражательной способности зеркала после насыщения. Одновременное выполнение вышеперечисленных условий для лазера ближнего ИК диапазона возможно путём МЛЭ структур группы A_3B_5 , включающих квантовые ямы с наноструктурированными барьерами, как это было продемонстрировано в [1] для лазера Yb³⁺:КY(WO₄)₂.

В докладе сообщается о физико-технических проблемах, возникающих при изготовлении подобных зеркал методом молекулярно-пучковой эпитаксии, и методах их решения на примере изготовления полупроводникового зеркала, обеспечивающего пассивную синхронизацию мод лазера Yb³⁺:KY(WO₄)₂ с повышенным уровнем мощности.

Литература

1. A.A. Kovalyov, V.V. Preobrazhenskii, M.A. Putyato, O.P. Pchelyakov, N.N. Rubtsova, B.R. Semyagin, V.E. Kisel', S.V. Kuril'chik, N.V. Kuleshov, Laser Phys. Lett., 2011 V.8, PP. 431-435.

Аналитическая микро- и нанофлюидная система на основе кремниевых канальных матриц

<u>Н.С. Филиппов</u>¹, Д.В. Пышный², П.П. Лактионов², С. И. Романов¹ ¹ Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова, Новосибирск, 630090, проспект Академика Лаврентьева, 13 ² Институт химической биологии и фундаментальной медицины, Новосибирск, 630090, проспект Академика Лаврентьева, 8 тел: (383) 333-2519, эл. почта<u>:filippov@isp.nsc.ru</u>

Представлены результаты, убедительно доказывающие, что на базе высокотехнологичного кремния могут быть созданы основные элементы микро- и нанофлюидных систем - фильтры, сенсоры и насосы. Разработан аналитический комплекс, включающий размер-селективные фильтры, электрофизический сенсор и электроосмотический насос, выполненные по единой технологии.

Прецизионные размеры и высокое структурное качество микроканальных кремниевых фильтров позволили практически реализовать быстрый и эффективный способ селективного выделения жизнеспособных, диагностически значимых клеток-мишеней из биологических жидкостей [1].

Продемонстрирован метод создания сухих концентратов наночастиц в нанопористых кремниевых плёнках, висящих в микроканалах кремниевых матриц, на примере электрофоретического фильтрования полупроводниковых квантовых точек CdS, и, тем самым, показана возможность получения биомедицинского препарата на биосовместимом материале [2].

Впервые созданный проточный электрофизический сенсор на основе кремниевого микроканального резистора с жидкостным затвором представлен как устройство контроля биологических буферных растворов с перспективой применения для анализа специфических гетерогенных молекулярных реакций [3].

Впервые предложено использовать асимметричные кремниевые микроканальные мембраны для изготовления эффективных электроосмотических насосов, действующих на новом принципе, а именно: используя эффект асимметрии каналов, эти устройства могут функционировать при переменном напряжении на электродах. Последнее позволит полностью избежать влияния электролиза воды на их работу [4].

Литература

[1] П.П.Лактионов, О.Б.Вайнер, И.А.Запорожченко, И.А.Пышная, Д.В.Пышный, Е.В.Дмитриенко, С.И.Романов, В.В. Власов, Патент 2 423 698 РФ. Заявлено 09.11.2009. Опубл. 10.07.2011 Бюл. №19.

[2] Н.С.Филиппов, Н.В.Вандышева, М.А.Паращенко, С.С.Косолобов, О.И.Семёнова, Р.О.Анарбаев, Д.В.Пышный, И.А.Пышная, С.И.Романов, ФТП **48**, 995 (2014).

[3] М.А.Паращенко, Н.В.Вандышева, В.В.Кириенко, Н.С.Филиппов, С.И.Романов, Микроэлектроника **42**, 23 (2013).

[4] М.А.Паращенко, Н.С.Филиппов, В.В.Кириенко, С.И. Романов, Автометрия 50 (3), 121 (2014).

Эллипсометрический in situ контроль в технологиях КРТ: проблемы, достижения и перспективы.

<u>В.А. Швец</u>, С.В. Рыхлицкий, Е.В. Спесивцев, В.Ю. Прокопьев, И.А. Азаров, Ю.Г. Сидоров, С.А. Дворецкий, Н.Н. Михайлов, М.В. Якушев.

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова, Новосибирск, 630090, Проспект Академика Лаврентьева, 13

Состав тройного соединения HgCdTe (КРТ) является одним из критических параметров, определяющих его электронные и оптические свойства. На сегодняшний день основным методом in situ контроля состава при МЛЭ эпитаксии слоёв КРТ является эллипсометрия, в частности быстродействующая одноволновая эллипсометрия на базе излучения He-Ne лазера. Выбор длины волны обусловлен её близостью к критической точке E_1 в оптических спектрах КРТ и обеспечивает высокую чувствительность эллипсометрических измерений к составу.

Технические требования к точности состава выращиваемых слоёв, определяемые потребительскими характеристиками ИК-фотоприёмных устройств, составляют 0.001 – 0.0005 мольных долей CdTe. Для этого необходимо обеспечить воспроизводимое измерение эллипсометрических параметров на уровне ~0.005°. Для достижения заявленной точности были изучены существующие источники нестабильности эллипсометрических измерений. Наиболее существенные из них это: разброс в позиционировании измеряемых пластин; дрейф энергетических, поляризационных и геометрических характеристик лазерного излучения; несовершенства поляризационных призм; наведённое двулучепреломление в фазосдвигающей призме типа ромба Френеля, неоднородность площадок фотодетекторов; возможный дрейф электронного усилителя сигналов.

Экспериментальные исследования и численное моделирование показали, что хотя каждая из перечисленных причин в отдельности может и не сказываться на результатах измерений, но в совокупности их действие может приводить к невоспроизводимому систематическому разбросу измеряемых эллипсометрических углов. На основе проведённых исследований был разработан и изготовлен малой серией специальный высокостабильный скоростной эллипсометр, функционирующий на базе запатентованной нами статической схемы эллипсометрических измерений. Предложены технические решения, позволившие добиться воспроизводимого позиционирования пластин в камере роста, избавиться от ряда несовершенств и нестабильностей различных элементов прибора. Эксплуатация такого эллипсометра в реальных технологических процессах показала долговременную воспроизводимость эллипсометрических измерений на высоком уровне, что обеспечивает требуемую точность технологического контроля состава слоёв КРТ.

В докладе подробно рассматриваются особенности создания высокоточной эллипсометрической аппаратуры высокого временного разрешения, вопросы метрологии такого класса приборов и приводятся результаты экспериментальных измерений различных структур ГЭС КРТ в масштабе реального времени. Проведенные исследования и опытно-технологические работы позволяют сделать вывод, что созданы все предпосылки к созданию полностью автоматизированного технологического процесса синтеза ГЭС КРТ нового поколения с использованием высокостабильного in situ эллипсометра в качестве основного средства контроля и элемента обратной связи для управления процессом роста.

Модификация свойств поверхности полупроводниковых материалов мягким рентгеновским излучением

<u>А.П. Мелехов</u>¹⁾, М.А. Алхимова¹⁾, Г.С. Богданов¹⁾, А. Бунин²⁾, И.О. Гончаров²⁾ ¹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г.Москва, Каширское шоссе, д.31 ² Московский промышленный колледж НИЯУ МИФИ, 115191,

Холодильный переулок, д.1

В технологии современных электронных приборов широко используются различные методы модификации свойств поверхности полупроводниковых материалов, которые позволяют управлять ее морфологией, электрофизическими и оптическими характеристиками, создавать поверхностные защитные структуры. Для этих целей используются различные методы: традиционные механические, химические и т.д., а также более сложные, например, метод плазменного травления. С его помощью удается не только изменять физические свойства, но и выполнять ряд технологических операций, например, формировать микролинзы в подложках матричных фотоприемников. При этом процессы модификации поверхности полупроводниковых материалов сопровождаются генерацией нежелательных дефектов структуры, которые могут проникать на значительную глубину в объем кристалла, что порождает потребность в проведении дополнительных компенсирующих процедур в виде операций отжига и т.д.

В настоящей работе рассматривается влияние мягкого рентгеновского излучения (МРИ) на состояние поверхности эпитаксиальных слоев $Cd_{0.2}Hg_{0.8}$ Те (ЭС), выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии. В качестве источника МРИ использовалась излучение плазмы, генерируемой импульсным лазером на алюминате иттрия с λ =1.079 мкм на поверхности Аl-мишени [1]. Энергия в импульсе ≤ 0.5 Дж при частоте следования до 3 Гц. Плотность потока излучения в фокусе составляет около 4×10^{11} Bт/см².



На рисунке показана поверхность ЭС до воздействия (левый рисунок) и после воздействия (правый рисунок). Как видно из рисунка, рентгеновское излучение приводит к изменению структуры поверхности, что позволяет рассматривать облучение МРИ, как новый способ травления полупроводниковых материалов.

Литература

1. 1. О.Б.Ананьин и др. Лазерная плазма. Изд.МИФИ,М,2003,400с.

Формирование границы раздела анодный оксид/InAs в газоразрядной плазме.

<u>М.С. Аксенов</u>¹⁾, А.Ю. Широков²⁾, О.Е.Терещенко^{1, 2)}, П.А. Половодов¹⁾, Н.А. Валишева¹⁾

¹ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, 630090, пр. Ак. Лаврентьева 13.

² Новосибирский Государственный Университет, Новосибирск, 630090, Пирогова 2

тел: (383) 330-8508, эл. почта: <u>aksenov@isp.nsc.ru</u>

Пассивация поверхности InAs(111)А тонким (15 нм) фторсодержащими анодными слоями, полученными анодным окислением в кислотном электролите, позволила получить низкую (2-12) 10^{10} эВ⁻¹см⁻² плотность интерфейсных состояний (D_{it}) [1]. Однако при этом не удалось получить однородную тонкую пленку <5nm и решить проблему гистерезиса ВФХ, причиной которого являются подвижные ОН и F -ионы, входящие в состав электролита.

В данной работе изучена возможность пассивации поверхности InAs альтернативным методом контролируемого роста фторсодержащего оксидного слоя – окислением в низкотемпературной газоразрядной плазме Таунсендовского или тлеющего разрядов. Схема окисления приведена на рисунке. В отличие от



электролита. имеющего сложный химический состав, в газовую смесь входит только особо чистые Ar, O₂ и источник ионов фтора CF₄. Метод позволяет выращивать однородные пленки толшиной 1-100 nm, при этом окисление морфологию не изменяет поверхности, что подтверждается AFM и HRTEM измерениями. Анализ поверхностного состава пленок показывает,

что добавление в газовую смесь CF₄ приводит к уменьшению концентрации As в оксиде, образованию оксифторидов In и As с большей шириной запрещенной зоны по сравнению с исходными оксидами. Оптимизацией соотношения O₂:CF₄ в газовой смеси и толщины слоя удалось:

1) практически полностью избавиться от встроенного заряда (V_{FB}<0.5B)

2) получить $D_{it} < 10^{11} \ эB^{-1} cm^{-2}$

3) в 2 раза уменьшить величину гистерезиса по сравнению с жидкостными анодными оксидами $\Delta Q \sim 5 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2$ при поле в слое $2 \cdot 10^6 \text{ B/см}$.

Литература

 М.С. Аксенов, Н.А. Валишева, Т.А. Левцова, О.Е. Терещенко. ФТП, 48(3), 322 (2014).

Исследование диффузии Ge на структурированных подложках Si методом молекулярной динамики

П.Л. Новиков^{1,2}, Ж. В. Смагина¹, А.В. Двуреченский^{1,2}

¹ Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова, Новосибирск. ² Новосибирский государственный университет, Новосибирск. тел: (383) 333-2519, факс: (383) 333-2771, эл. почта: novikov@isp.nsc.ru

Создание пространственно упорядоченных массивов полупроводниковых квантовых точек является одной из наиболее актуальных задач физики и материаловедения. Вероятные успехи в этом направлении связаны с ростом гетероэпитаксиальных пленок на структурированных подложках. Для приготовления таких подложек на их поверхности с помощью литографии формируется система пространственно упорядоченных ямок. После предростовой подготовки структурированной поверхности осаждение на нее пленки с иным параметром кристаллической решетки приводит к образованию наностровков в ямках [1]. Данная работа посвящена исследованию диффузии Ge на структурированной поверхности Si методом молекулярной динамики (МД). Моделируемым объектом в нашей задаче была структура Si/Ge(001)-2×1, содержащая ямку в форме перевернутой прямоугольной пирамиды (рис. 1а). Для моделируемой структуры рассчитана энергетическая поверхность (рис. 1b). Анализ энергетической поверхности показал, что в ямках располагается система глубоких минимумов, способствующих



Рис. 1. (а): Моделируемая структурированная поверхность (вид сверху). (b): Энергетическая поверхность, рассчитанная внутри прямоугольного фрагмента моделируемой структуры.

преимущественному стоку Ge в ямки при осаждении Ge. Также в работе рассчитана энергия различных морфологий Ge, заполняющего ямку. Показано, что при размере ямки меньше ~20нм энергетически выгодно ее заполнение в режиме двумерно-слоевого роста. При большем размере ямки энергетически выгодной оказывается конфигурация наноостровка Ge в форме hut-кластера с центром на донышке ямки.

Литература

[1] Zh. Zhong, A. Halilovic, T. Fromherz, F. Schäffler, and G. Bauer, Twodimensional periodic positioning of self-assembled Ge islands on prepatterned Si (001) substrates, Appl. Phys. Lett. 82, 4779 (2003).

Влияние физико-химических свойств поверхности нитевидных кристаллов кремния на генерацию нервных волокон

<u>О.В. Наумова</u>¹⁾, А.И.Климовская²⁾, Ю.Н.Педченко²⁾, И.Г.Луцишин²⁾, Н.А.Высоцкая²⁾, А.В.Корсак³⁾, В.В.Лиходиевский³⁾, Ю.Б.Чайковский³⁾

¹ Институт физики полупроводников им Ак. А.В. Ржанова, Новосибирск, 600090, просп. Лаврентьева 13, эл. почта: <u>naumova@isp.nsc.ru</u> ² Институт физики полупроводников им. В.Е.Лашкарёва, Киев, 03600, просп. Науки 41, эл. почта: <u>kaignn@gmail.com</u> ³ Национальный медицинский университет им. А.А.Богомольца, Киев, 01601, просп. Т. Шевченко 13

Регенерационная наномедицина в настоящее время является одной из самых востребованных областей практической медицины. Особое внимание уделяется восстановлению нервной системы после тяжелых травм конечностей и заболеваний головного мозга. Исследования в этой области проводятся в нескольких направлениях: разработка средств, которые стимулируют естественную регенерацию нервной ткани; разработка имплантатов, замещающих поврежденные участки нервной системы; разработка и вживление наноэлектронных приборов, включая нанокомпьютеры, способных заменить поврежденные участки мозга. Ключевой проблемой этих работ является исследование физико-химического состояния интерфейса "нанообъект - нервная ткань" и разработка методов целенаправленного управления его свойствами.

В настоящей работе эксперименты проводились in vivo методом моделирования травмы седалищного нерва у крыс линии Whistar. Последующее восстановление нервной ткани осуществлялось путем вживления имплантата, содержащего нитевидные кристаллы кремния. Выбор нитевидных кристаллов кремния для изготовления имплантатов обусловлен тем, что предварительные эксперименты [1] показали эффективность их использования для регенерации нервного волокна. В настоящей работе основное внимание уделялось формированию границы раздела «нейрон-кристалл» и влиянию физико-химических свойств границы на генерацию нервной ткани. В работе были использованы кристаллы, выращенные методом газо-транспортных реакций в изолированных ампулах [2]. Размеры кристаллов варьировались в 2-х пределах от 10 до 300 нм и от единиц до нескольких десятков микрон. На поверхности кристаллов выращивались окислы кремния разных модификаций и разной толщины.

Анализ полученных результатов показал сильную зависимость способности организма генерировать нервное волокно от физико-химических свойств границы раздела «нейрон-кристалл».

- 1. V. Lichodievskiy, N. Vysotskaya, O. Ryabchikov et al. // Advanced Materials Research 2014. V. 854, N.1. P.157-163.
- A.I. Klimovskaya, I. P. Ostrovskii, A. S. Ostrovskaya // physica status solidi (a) 1995. V.153, N. 2. P.465 – 472.

Расчет уровней перезарядки в гетероструктурах p-Si/Si_{1-x} Ge_x/Si

Т.Е.Тимофеева, П.В. Винокуров, С.А.Смагулова

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К.Аммосова, г.Якутск, 677000, Белинского, 58

тел: (4112) 496614, эл. почта: <u>pv.vinokurov@s-vfu.ru</u>

Выполнены расчеты уровней перезарядки квантовой ямы SiGe гетероструктуры p-Si/Si_{1-x}Ge_x/Si с шириной 14 нм и различным содержанием Ge x=0.07,0.10 и 0.15 с учетом напряженности слоя Si_{1-x}Ge_x. Квантовая яма легирована посередине дельта слоем бора с концентрацией $6*10^{11}$ см⁻². Предложен подход к расчету системы уровней в квантовой яме, основанный на решении уравнения Шредингера в приближении эффективной массы для огибающих волновых функций для тяжелых и легких дырок в отдельности:

 $-\frac{\hbar^2}{2m^*}\frac{d^2F_i(z)}{dz^2}+V(z)F_i(z)=E_iF_i(z)$,где $F_i(z)$ -огибающая, m^* - эффективная масса

легких и тяжелых дырок. Потенциал квантовой ямы V определяется разрывом валентных зон $\Delta E_{p} = 0.74 \times x$ для случая низких температур, когда акцепторы не ио-Для легких дырок потенциал берется низированы. с поправкой $V(z) = -0.74 \times x + \delta E_{\partial e \phi}$, где $\delta E_{\partial e \phi}$ - сдвиг глубины ямы, обусловленный сжатием слоя в направлении z. Расчеты выполнены также для температур (T>80 K), когда акцепторы ионизированы и в яме образуется двумерный дырочный газ. Во втором случае дополнительно учитывался потенциал дельта слоя ионизированных акцепторов V_δ с V-образным профилем, полученным из уравнения Пуассона $\frac{d^2 V_{\delta}}{dz^2} = \frac{4\pi e^2}{\varepsilon} \left(N_a^- \delta(z) - p(z) \right)$, где $N_a^- = p_{2D}$ -концентрация ионизированных примесей, p(z) -концентрация дырок, в приближении Томаса –Ферми [1]. Сравнение полученных результатов для x=0.15 ($m_{hh} = 0.272m_0$, $m_{lh} = 0.187m_0$, $\varepsilon = 12.5$) E_a-^{рас}=25,57,83,95 мэВ (тяжелые дырки) с данными экспериментального исследования методом зарядовой спектроскопии глубоких уровней Q-DLTS $E_a^{_{3}\kappa c}$ =11,28,57,83, 93 мэВ [2] показали хорошее совпадение.

- 1. L.M. Gaggero-Sager et al// Solid State Electronics.2000.V.44. P. 175-183.
- 2. Antonova et al.// J. Appl. Phys.2009.106. 084903 (1-4)

Полупроводниковый искусственный графен: дизайн, критический беспорядок и дираковские эффекты

<u>O.A.Tкаченко¹</u>, B.A.Tкаченко¹, O.P.Sushkov²

¹Институт физики полупроводников им. А.В.Ржанова, Новосибирск, 630090, Лаврентьева, 13

²School of Physics, University of New South Wales, Sydney 2052, Australia тел: 8(913) 467-4791, факс: (383) 333-1080, эл. почта: <u>otkach@isp.nsc.ru</u>

Идея искусственного графена как треугольной решетки антиточек выдвинута в 2009 году, но не реализована. Это не удивительно, поскольку за 25 лет изучения массивов квантовых точек и антиточек в двумерном электронном газе полупроводниковых структур минизонные эффекты так и не были надежно зарегистрированы. Чтобы создать искусственный графен, необходимо не только подавить беспорядок, но и решить задачу структурно-полевого управления удерживающим потенциалом для формирования дираковской точки, не перекрытой другими состояниями разрешенных минизон, а также для совмещения ее с уровнем Ферми. Выбор структур, позволяющих такую подстройку, и оценка критического уровня беспорядка, при котором дираковские эффекты все еще сохраняются, требуют расчетов. Мы занимались оптимизаций дизайна структур для экспериментальной группы Алекса Гамильтона (Университет Нового Южного Уэльса, Австралия). Расчеты выполнялись на машине МВС-10П Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН (Москва). Трехмерный электростатический потенциал и электронная плотность определялась самосогласованно в подходе Томаса-Ферми с использованием 2D плотности состояний. что переоценивало постоянной экранировку неоднородностей удерживающего потенциала. Для этого потенциала методом рекурсивных функций Грина решалась задача квантового рассеяния электронов на решетке антиточек, встроенной в широкий канал. Эффекты контролировались по зависимостям коэффициента прохождения электронов от энергии и магнитного поля, а также по локальной плотности состояний. Рассмотрены варианты структур GaAs/AlGaAs с разной глубиной залегания индуцированного двумерного электронного газа и разной постоянной решетки. Конструкция предусматривала формирование удерживающего потенциала двумя металлическими затворами. Затвор Шоттки предложен в виде широкой полоски, в которой присутствует переходная область с гексагональной решеткой отверстий. Минимальный беспорядок имитировался варьированием положений или диаметров отверстий с разбросом 2.5 нм. Поверх слоя диэлектрика предлагалось нанести сплошной металлический затвор. Расчетами подбирались затворные напряжения, обеспечивающие нужную амплитуду модуляции удерживающего потенциала. Притягивающее напряжение на затворе Шоттки дает широкого канала электронами, в том числе, под областью заполнение перфорации. Отталкивающее напряжение на сплошном затворе дает высокие барьеры на краях канала и антиточки, благодаря прохождению силовых линий через отверстия в затворе Шоттки. Обнаружено, что запрещенная щель между второй и третьей минизонами сохраняется при минимальном беспорядке в диаметрах отверстий для рассмотренных конструкций, т.е. решетку антиточек можно считать квантовым кристаллом. При этом беспорядке для одной из структур сохраняются также первая и вторая дираковские точки, т.е. решетку антиточек можно считать искусственным графеном.

Формирование проводящих микротрубок и гофрировок ZnTe/CdHgTe/HgTe/CdHgTe с двумерным электронно-дырочным газом в квантовой яме HgTe

<u>С.В. Мутилин</u>¹⁾, А.Б. Воробьёв¹⁾, Р.А. Соотс¹⁾, Д.Г. Икусов¹⁾, Н.Н. Михайлов¹⁾, В.Я. Принц¹⁾

¹ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, 630090, пр. Ак. Лаврентьева, 13 тел: (383) 333-0699, факс: (383) 330-5636, эл. почта: mutilin@isp.nsc.ru

Высокоподвижные структуры из кадмий-ртуть-теллура (КРТ) привлекают повышенное внимание благодаря своим необычным свойствам зонной структуры. При превышении определенной толщины (>6,3 нм) квантовой ямы HgTe (с широкозонными обкладками Cd_xHg_{1-x}Te, x≅0,7) происходит инвертирование зонной структуры, т.е. слой HgTe становится полуметаллом. Бесщелевая структура КЯ HgTe позволяет реализовать уникальные двумерные системы, состоящие из нескольких типов двумерных носителей зарядов (электронов и/или дырок) [1]. До сих пор формировались и исследовались только планарные структуры из КРТ. Создание полупроводниковых оболочек малого радиуса кривизны [2] для структур из КРТ открывает новые перспективы. Ранее было показано, что в плоской пленке малые (~0,3%) механические напряжения HgTe (для КЯ шире 6.3 нм) в обкладках CdHgTe радикально меняют ее энергетический спектр E(k) [3]. В оболочках из КРТ, за счет значительных деформаций, возникающих в местах их изгиба можно осуществить переход зонной структуры слоя НgTe из полупроводникового состояния в полуметалическое, и наоборот. Данная работа посвящена созданию способа формирования оболочек из КРТ.

КРТ Экспериментальные образцы были выращены с помошью молекулярно-лучевой эпитаксии. На плоских структурах было получено, что в КЯ HgTe одновременно присутствуют двумерные электроны и дырки. Напряженная пленка с КЯ HgTe была отделена от подложки посредством селективного травления жертвенного слоя и под действием частичной релаксации внутренних механических напряжений приняла форму гофрировок и свитков. Диаметр трубок составил 24 мкм, радиус кривизны гофрировки составил примерно 13 мкм. Значительные деформации (до 1,2%) в сформированных оболочках, возникающих в местах их изгиба, достаточны для изменения зонной структуры слоя HgTe от полупроводникового состояния к полуметаллическому.

СЭМ изображения были получены в ЦКП «Наноструктуры». Работа была частично поддержана РФФИ (грант 12-02-00918-а).

- 1. Z. D. Kvon et al., *Low Temp. Phys.* 2009, **37**, 3, 202.
- 2. V. Ya. Prinz et al., *Physica E*, 2000, **6**, 828.
- 3. C. Brune, et al., *Phys. Rev. Lett.*, 2011, **106**, 126803.

Оценка вклада энергии образования дополнительных ребер в изменение свободной энергии при росте квантовой точки

<u>К.А.Лозовой</u>¹⁾, А.П.Коханенко¹⁾, А.В.Войцеховский¹⁾

¹ Томский государственный университет, Томск, 634050, Ленина, 36 тел: (382) 241-3517, факс: (382) 241-2772, эл. почта: <u>lka@sibmail.com</u>

Гетероструктуры с квантовыми точками получили очень широкое применение в приборах оптоэлектроники. Однако до сих не реализованы все их потенциальные возможности, и они остаются одними из самых перспективных структур для создания таких устройств, как фотодетекторы и солнечные элементы. Квантовые точки Ge на Si привлекают внимание исследователей с начала 1990-х годов. Но несмотря на ведущиеся активные теоретические и экспериментальные исследования между ними до сих пор не достигнуто согласия, и теория пока не может надежно предсказать результаты ростового эксперимента.

Существует целый ряд различных теоретических описаний различной степени сложности, позволяющих оценивать поверхностную плотность и средний размер островков в ансамбле квантовых точек. Однако среди них можно выделить так называемую кинетическую модель, развитую в работе [1]. Особая роль этой модели объясняется тем, что она позволяет рассчитать не только стационарные параметры массива квантовых точек, но и промоделировать их изменение в динамике, а также, и это самое главное, предсказать функцию распределения квантовых точек по размерам. В своем классическом варианте эта модель опирается на выражение для изменения свободной энергии атомов при переходе из смачивающего слоя в островок, учитывающее изменение свободной энергии за счет образования дополнительной поверхности граней, релаксации упругих напряжений и уменьшения притяжения атомов к подложке. При этом, однако, не учитывается вклад в изменение свободной энергии за счет образования в островке дополнительных ребер, так как считается, что это вклад пренебрежимо мал. В тоже время, полученные авторами работ [2, 3] значения для энергии, приходящейся на единицу длины ребра, говорят об их сопоставимости с соответствующими величинами удельной энергии образования для дополнительных граней и изменения свободной энергии за счет релаксации упругих напряжений в островке.

В настоящей работе проводится оценка степени влияния дополнительной энергии ребер квантовой точки на рост и структуру островков, показывается необходимость учета в выражении для свободной энергии образования островка в модели [1] слагаемого, отвечающего за энергию образования дополнительных ребер.

- 1. В.Г.Дубровский // ФТП. 2006. Т. 40, вып. 10. С. 1153-1160.
- 2. C.M. Retford et al. // Physical Review B. 2007. V. 75. P. 075311 (1-8).
- 3. F. Montalenti et al. // Comptes Rendus Physique. 2013. V. 14. P. 542-552.

Транспортные процессы в наноразмерных кремниевокислородных системах

И.В. Матюшкин^{1,2)}

¹ ОАО «НИИ молекулярной электроники, Москва, Зеленоград, 124460, 1-й Западный проезд, 12/1, эл. почта: <u>imatyushkin@mikron.ru</u> ² Московский институт электронной техники, Москва, Зеленоград, тел. 8(906)048-21-11

В докладе обсуждается определение «наноразмерной кремниевокислородной» системы, широта которого сужена ссылкой на функциональность, но под которое, тем менее, подпадает достаточно много случаев. Функциональность тесно связана с транспортными процессами (или, наоборот, блокировкой транспорта), связанными с переносом носителей заряда, вещества (не только атомов кремния или кислорода, но и примесей, что ведет к понятию «структурно-примесного комплекса» [1,2]).

Особое внимание уделяется процессам прямого непрямого И туннелирования [3] на примере наноразмерной МДП-системы, где диэлектрик либо многослойный, либо наноструктурирован кремниевыми кластерами (что актуально для ячеек энергонезависимой памяти [4]). Оба вида транспорта, электронный и ионный, могут объединяться, приводя к гистерезисным эффектам, деградации диэлектрика или, более обще, перестройке структуры диэлектрика. Последнее наиболее ярко проявляется при работе резистивной памяти на основе SiO_x: для этого случая сформулирована простая аналитическая модель. Отдельным видом транспорта выступает диффузия и преобразование точечных дефектов, рассмотренные на примере SiMOX (и частично, на примере преципитации кислорода в монокристаллическом кремнии – что, однако, уводит нас от определения, также как и самоорганизация субоксидного слоя SiO_x при высокотемпературном отжиге [5]).

Нами сделана попытка найти общую базу для описания этих многообразных процессов и систем, ставших классическими для микро- и теперь уже опто- и наноэлектроники. Очевидным обоснованием для этого служит единство стехиометрии – только Si, только O и, возможно, примесь в нестехиометрическом количестве.

- 1. Г.Я. Красников, Н.А. Зайцев, И.В. Матюшкин. // Микроэлектроника. 2000г. Т.29, вып.5. С.348-352.
- 2. Г.Я. Красников, Н.А. Зайцев, И.В. Матюшкин. // ФТП, 2003. Т.37, вып.1.С. 44-50.
- 3. Г.Я. Красников, Н.А. Зайцев, И.В. Матюшкин. // Микроэлектроника. 2011. Т. 40, вып. 1. С. 30-35.
- 4. И.В. Матюшкин. // Нано- и микросистемная техника, 2012, вып. 3, С.34-41
- 5. И.В. Матюшкин, С.В. Коробов. // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2011. вып. 6(92). С. 39-48.

Квантово-химические расчеты некоторых кремниевокислородных кластеров вида Si_nO_m (m<2n, n<10)

И.В. Матюшкин¹⁾, Н.В. Евстратов²⁾

¹ ОАО «НИИ молекулярной электроники, Москва, Зеленоград, 124460, 1-й Западный проезд, 12/1, эл. почта: <u>imatyushkin@mikron.ru</u> ² Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, 141707, Институтский пер., 9, эл. почта: <u>nekit05@mail.ru</u>

Актуальность темы связана с многообразным проявлением кремниевокислородных систем в современной микро- и наноэлектронике, прежде всего: 1) в подзатворной системе Si/SiO₂ и присущим ей пограничном/переходном [1], формирующемся при и после термическом окисления, слое субоксидов SiO_x; 2) в межфазной границе кремний – high-K диэлектрике, способной к накоплению заряда; 3) в межфазных границах в Si/SiO₂-сверхрешетках или системе «nc-Si/SiO₂»; 4) в SiMOX-технологии; 5) в кислородных преципитатах; 6) в резистивной памяти на основе SiO_x; 7) в нанопроволочных структурах с интерфейсами Si(ядро)/SiO₂(покрытие) или даже SiO₂(провод)/Si(подложка). В астрофизике звездной пыли также изучаются такие кластеры [2]. За последние два



десятилетия накоплен большой опыт [3] моделирования Si_nO_m-кластеров, однако вариативность условий их формирования и полиморфность изомеров ведут к неполноте получаемых результатов.

Рис. Расчет кластера (Si₄O₁₀)(+4H) для имитации объема SiO₂ в программе HyperChem (Ab Initio Method, Basis Large 6-31G**). Коричневыми шарами обозначен кислород, синими водород серыми кремний. И Показаны ллины связей между атомами.

- Г.Я. Красников, Н.А. Зайцев, И.В. Матюшкин. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2003. № 2. С. 98-104.
- 2. Marcus John. PhD, 2003, Berlin, 241p. <u>http://opus4.kobv.de/opus4</u>tuberlin/files/628/john_marcus.pdf
- Q. J. Zang, Z. M. Su, W. C. Lu, C. Z. Wang, K. M. Ho. Oxidation Pattern of Small Silicon Oxide Clusters: Structure and Stability of Si₆O_n // J. Phys. Chem. A 2006, 110, 8151-8157

Корреляция между оптическими и магнитооптическими свойствами тонких пленок La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ и Pr_{1-x}Sr_xMnO₃ с типом их проводимости

<u>Ю.Э. Гребенькова</u>¹⁾, И.С. Эдельман¹⁾, А.Э. Соколов¹⁾, В.И. Чичков²⁾, Н.В. Анлреев²⁾

¹ Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск, 660036, Академгородок, 50, стр. 38 ² Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС", Москва, 119049, Ленинский проспект, 4 тел: (391) 243-2635, факс: (391) 243-8923, эл. почта: <u>uliag@iph.krasn.ru</u>

Впервые исследована магнитооптика манганитов празеодима на примере тонких поликристаллических пленок $Pr_{1-x}Sr_xMnO_3$ (x = 0.2 и 0.4) в сопоставлении с магнитооптическими свойствами пленок $La_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$. Пленки различной толщины от 20 до 150 нм были изготовлены методом реактивного высокочастотного магнетронного распыления на постоянном токе из однофазных мишеней требуемого состава с использованием распылительной системы со сдвоенными катодами.

Показано, что спектры магнитного кругового дихроизма (МКД) содержат больше особенностей по сравнению с оптическими спектрами, форма интегральных МКД спектров идентична для образцов с различным содержанием стронция и не зависит от толщины исследованных пленок. При понижении температуры в спектрах МКД пленок с металлической проводимостью появляется дополнительный пик.

Кроме того, впервые для манганитов наблюдался магнитный линейный Обнаружено, дихроизм (МЛД). что спектры МЛД демонстрируют дополнительные спектральные особенности по сравнению со спектрами МКД. Полученные магнитооптические спектры были аппроксимированы суммой лоренцевых и гауссовых компонент. Обнаружена зависимость температурного поведения интенсивности компонент от типа проводимости замещенного манганита: в случае ферромагнитного изолятора интенсивность всех компонент имеет одинаковый температурный ход, совпадающий с ходом намагниченности; в случае металлического образца спектральные линии характеризуются различными температурными зависимостями их интенсивностей.

Прослежена корреляция особенностей МКД в различных спектральных интервалах с величиной концентрации Sr²⁺ в образцах. Установлена природа наблюдаемых МКД и МЛД спектральных линий.

Ускоренный рост нанокристаллов Ge в SiO₂ под действием гидростатического давления

<u>И.Е. Тысченко</u>, В.А. Володин, А.Г. Черков Институт физики полупроводников им. А.В.Ржанова СО РАН, Новосибирск, 630090, пр.Лаврентьева, 13 тел: (383) 333-2493, факс: (383) 333-2771, эл. почта: <u>tys@isp.nsc.ru</u>

Синтез нанокристаллов кремния и германия в пленках диэлектриков привлекает внимание исследователей в последние десятилетия как с точки зрения создания светоизлучающих структур на основе кремния, так и с целью формирования центров захвата электронов для компенсации встроенных положительных зарядов в SiO₂ для повышения его стойкости к ионизирующему облучению. Большим преимуществом по сравнению с другими методами в данном случае обладает метод ионно-лучевого синтеза как наиболее совместимый с имеющейся кремниевой технологией. Важным параметром ионного синтеза является давление атмосферы во время отжига. Ранее нами было показано, что увеличение гидростатического давления при температуре отжига около 450° С пленок SiO₂, имплантированных ионами кремния, приводит к росту концентрации молекулярно-подобных кластеров, обусловленных дефицитом кислорода. Целью данной работы является исследование формирования нанокристаллов германия в пленках SiO₂ в условиях гидростатического сжатия.

В экспериментах имплантация ионов Ge⁺ с энергией 75 кэВ дозой $\sim 2.3 \times 10^{15}$ - 3.1×10^{16} см⁻² проводилась в термически окисленные слои SiO₂ толщиной 100 нм. Последующий высокотемпературных отжиг проводился в атмосфере Ar при температурах 600-1130° C в течение 1 часа при гидростатическом сжатии P=(0.1-1.1)×10⁴ бар. Для сравнения проводился отжиг соответствующих образцов при атмосферном давлении. Исследования проводились методами спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС), высокоразрешающей электронной микроскопии на поперечном срезе, а также с помощью энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии.

Обнаружено, что с ростом давления во время высокотемпературного отжига предотвращается проникновение германия из слоя SiO₂ в подложку Si и происходит формирование нанокристаллов германия на глубине средних пробегов ионов Ge⁺. При давлении около 10^4 бар нанокристаллы Ge со средними размерами около 5-7 нм формируются уже при температуре отжига 800° C, что на $200-300^{\circ}$ C ниже, чем в случае отжига при атмосферном давлении. Из полученных функциональных зависимостей объемной плотности и размеров нанокристаллов от температуры отжига и концентрации имплантированных атомов Ge сделан вывод о том, что формирование нанокристаллов германия происходит в соответствие с гомогенным механизмом распада пересыщенного твердого раствора Ge в SiO₂, и последующий их рост происходит за счет диффузии имплантированных атомов. По скорости роста нанокристаллов Ge определен коэффициент диффузии Ge в SiO₂ как функция температуры отжига. Обнаружено, что энергия активации диффузии Ge под давлением 10^4 бар уменьшается в 3 раза по сравнению со ее значением при P=16ар.

Ионно-лучевой синтез нанометровых слоев Ge на границе раздела Si/SiO₂ структур кремний-на-изоляторе

<u>И.Е. Тысченко</u>¹⁾, Р.L. Grande²⁾, В.А. Володин¹⁾, В.П. Попов¹⁾

¹ Институт физики полупроводников им. А.В.Ржанова СО РАН, Новосибирск,

630090, пр.Лаврентьева, 13

² Institute of Physics, UFRGS, Porto Alegre, 9500, Brazil тел: (383) 333-2493, факс: (383) 333-2771, эл. почта: <u>tys@isp.nsc.ru</u>

Формирование полупроводниковых гетероструктур SiGe рассматривается как эффективный способ увеличения подвижности носителей заряда в наноразмерном канале МДП транзистора. При этом одной из ключевых проблем является проблема планарной совместимости материалов. Решение этой проблемы может быть достигнуто за счет ионного синтеза промежуточных слоев Ge на границе раздела Si/SiO₂. В условиях ионно-лучевого синтеза проблема планарной несовместимости слоев может быть минимизирована за счет генерации неравновесных точечных дефектов, которые в процессе роста облегчают вращение кристаллографических плоскостей синтезируемых слоев относительно плоскостей кремния.

В основе разработанного нами метода создания слоев SiGe на изоляторе использовано свойство германия сегрегировать к границе раздела Si/SiO2 из имплантированного слоя SiO₂. Имплантация ионов Ge⁺ с энергией 40 кэВ дозой ~ 8×10^{15} см⁻² проводилась в термически окисленные слои SiO₂ толщиной около 0.2 мкм и на имплантированном слое методом водородного переноса формировалась пленка монокристаллического Si толщиной ~0.5 мкм. Формирование слоя Ge на границе Si/SiO₂ происходило в процессе последующего высокотемпературного отжига. Исследование кинетики накопления Ge и структуры слоев изучались методами резерфордовского обратного рассеяния и высокоразрешающей электронной микроскопии на поперечном срезе, а также после утонения слоя кремния до 3-30 нм – методом рассеяния ионов средних энергий и спектроскопии комбинационного рассеяния света. Электрофизические свойства слоев нанометровой толщины изучались измерением эффекта Холла.

Исследование кинетики накопления атомов германия на границе Si/SiO₂ и термодинамический анализ системы Si/Ge/SiO₂ показали, что формирование слоя Ge происходит в результате сегрегации атомов Ge из слоя SiO₂ к границе раздела Si/SiO₂, формирования твердого раствора SiGe и последующего его плавления при температуре 1100° С. Показано, что процесс роста слоя Ge лимитирован диффузией атомов германия в кристаллическую матрицу. При ионном синтезе слоя германия на границе раздела Si/SiO₂ в пленках кремния нанометровой толщины обнаружены деформации, перпендикулярные к её поверхности, природа которых объясняется тетрагональными искажениями решетки кремния за счет встраивания атомов германия в узловые позиции. Установлено, что в синтезированных слоях SiGe нанометровой толщины холловская подвижность дырок в 2-3 раза выше ее значения в соответствующих слоях кремния.

Легирование кремния атомами эрбия методом имплантации вторичных ионов.

<u>К.В. Феклистов</u>¹⁾, Д.С. Абрамкин¹⁾

¹ Институт физики полупроводников им. А.В.Ржанова СО РАН, Новосибирск, 630090, пр-кт ак. Лавреньева, 13 тел: (383) 333-2537, факс: (383) 333-2771, эл. почта: kofeklistov@gmail.com

В работе рассмотрен нетрадиционный способ легирования кремния атомами эрбия - метод имплантации вторичных ионов. Практическая направленность исследования структур кремния, легированных эрбием, определяется их излучательной способностью на длине волны 1.54 мкм. Эффективные излучатели в этом диапазоне найдут свое применение в телекоммуникационных системах. Кроме того, получение светоизлучающих структур на основе кремниевой технологии позволит сформировать базу для оптических вычислительных систем.

Интенсивное исследование легированного эрбием кремния началось с 1983 г с работ Ennen [1], и, как можно видеть из обзоров, продолжается по настоящее время [2,3]. Традиционными способами легирования эрбием являются ионная имплантация ионов эрбия в кремний и легирование атомами эрбия в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) [4,5]. Это хорошо зарекомендовавшие себя методы для получения свето-диодных структур. Однако, эффективность излучения в таких структурах — низкая, около 0.1%.

Суть метода имплантации атомами отдачи, заключается в имплантации с высокой энергией первичных ионов аргона (это могут быть и атомы кремния или любые другие нейтральные атомы) через напыленную пленку эрбия. При этом первичные атомы передают часть своей энергии атомам эрбия и те проникают в подложку кремния. Сами первичные атомы за счет своей высокой энергии проникают глубоко в подложку. Поверхность при этом легируется атомами эрбия. Преимущество легирования данным методом в том, что достигается повышенная концентрация эрбия в кремнии, вплоть до формирования силицида эрбия. Возможным недостатком метода может оказаться тонкий слой легирования.

Согласно расчетам SRIM глубина имплантации вторичных ионов эрбия составляет не более 2 нм. Однако, согласно имеющимся экспериментальным литературным данным, эта глубина оказалась в 6 раз выше расчетной для атомов золота в сапфире [6]. Возможной причиной этого явления представляется баллистическое перемешивание и радиационно ускоренная диффузия в процессе имплантации. Для исследуемой системы этот вопрос предстоит выяснить.

- 4. H. Ennen et. al. // J. Appl. Phys. (1987) V.61, p.4877
- 5. В.Н. Соболев // ФТП. 1995. Т.29, вып.7. С.1153.
- 6. Kenyon // Semicond. Sci. Technol. (2005) 20 p. R65
- 7. Андреев Б.А., Красильник З.Ф. и др.// ФТТ 2005 Т.47, вып.1 С.83
- 8. Соболев Н.А., Денисов Д.В. и др.//ФТТ 2005 Т.47, вып.1, С.112
- 9. Lihong Zhou, et. al. // NIMB 2012 V.278, P.42-45

Магнетосопротивление анизотропного диска Корбино

Д.В. Номоконов

Институт Физики Полупроводников им. А.В.Ржанова, Новосибирск, 630090, пр. ак. Лаврентьева 13 тел: (383) 330-77-72, эл. почта: nomokonov@isp.nsc.ru

Диск Корбино (ДК) широко применяется ДЛЯ измерения магнетосопротвления (МС) самых разнообразных материалов, включая сверхпроводящие плёнки, ферромагнитные полупроводники [1], графен [2]. Многие из этих материалов обладают заметной анизотропией транспортных свойств. Это нарушает аксиальную симметрию распределения токов, имевшуюся в изотропном ДК. Необходимо выяснить в какой мере анизотропия влияет на результаты измерений МС в ДК.

Расчёт МС анизотропного диска Корбино (АДК) проводился в рамках классического макроскопического описания транспорта, без учёта контактных явлений. Был проведён расчёт линий тока в АДК в магнитном поле. На основе этого получено аналитическое выражение для сопротивлений криволинейных анизотропных лент, составляющих диск:

$$\Delta R = \frac{1 + \nu \sin 2\theta_a}{e n \mu_{xy} \Delta \theta_a (\alpha \cos^2 \theta_a + \gamma \sin^2 \theta_a)} \left\{ \ln \frac{b}{a} + \left[\frac{1}{2} \ln \left| 1 + \nu \sin 2\theta \right| - \nu \frac{\nu + \gamma + (1 + \gamma \nu)u}{u^2 + 2\nu u + 1} \right] \Big|_{u_a}^{u_b} \right\}$$

где *a*, *b* – внутренний и внешний радиусы диска, *n* – концентрация носителей, $v \equiv (\mu_{xx}-\mu_{yy})/2\mu_{xy}$, $\alpha \equiv \mu_{xx}/\mu_{xy}$, $\gamma \equiv \mu_{yy}/\mu_{xy}$, μ_{xx} , μ_{yy} , μ_{xy} – компоненты тензора подвижности, θ – полярный угол, $u \equiv tg(\theta)$, $u_a \equiv tg(\theta_a)$, $u_b \equiv tg(\theta_b)$, θ_a и θ_b – значения θ на краях (при r = a и r = b), $\Delta \theta_a$ – угловой размер ленты в её начале.

Суммирование проводимостей таких лент позволило получить выражение для магнетопроводимости (МП) всего АДК в виде однократного интеграла. Проведено исследование поведения МП АДК в зависимости от отношения *b/a* и величины анизотропии μ_{yy}/μ_{xx} . Оказалось что с ростом магнитного поля *B* магнетопроводимость G(*B*) монотонно изменяется в пределах коридора, задаваемого снизу её величиной при нулевом поле G(0), а сверху – её асимптотикой при сильном поле G(∞). Обнаружено, что G(∞) соответствует изотропному случаю с $\mu_{eff} = (\mu_{xx} + \mu_{yy})/2$.

Предложен способ определения обеих компонент тензора подвижности μ_{xx} и μ_{yy} из анализа данных измерения G(B) АДК. Оценено вызванное анизотропией отклонение результатов измерений от изотропного случая. Для сильного магнитного поля получена приближённая формула магнетосопротивления АДК, обобщающая известную формулу Корбино.

- 1. M.H.S.Owen et al. // New J. Phys. 2009. v.11, p.023008
- 2. Yue Zhao et al. // PRL 2012. v.108, p.106804

Коррекция эффекта близости при формировании фотонных кристаллов методом электронно-лучевой литографии

К.А. Конфедератова^{1,2}, Е.Е. Родякина^{1,2}

¹Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, 630090, проспект ак. Лаврентьева, 13 ² Новосибирский Государственный Университет, Новосибирск, 630090, ул. Пирогова, 2

В настоящее время одним из актуальных направлений развития нанотехнологий является разработка метаматериалов, например, таких как фотонные кристаллы (ФК), структура которых характеризуется периодическим изменением показателя преломления в пространственных направлениях. Одним из наиболее точных способов создания наноструктур является метод травления через маску из резиста, сформированную с помощью электронно-лучевой литографии (ЭЛЛ).

Механизм экспонирования, вследствие взаимодействия электронов с образцом, является сложнейшим процессом. При этом появляется такая проблема, как эффект близости, оказывающая негативное влияние на разрешающую способность ЭЛЛ.

Эффект близости в ЭЛЛ описывается функцией близости:

$$f(r) = \frac{1}{\pi(1+\eta)} \left[\frac{1}{\alpha^2} \exp\left(\frac{-r^2}{\alpha^2}\right) + \frac{\eta}{\beta^2} \exp\left(\frac{-r^2}{\beta^2}\right) \right]$$

Коэффициенты α – размер первичного пучка с учетом рассеяния его в резисте при прямом прохождении, β – характерный размер области рассеяния электронов материале подложки, η – коэффициент обратно рассеянных электронов. Доза, поглощенная резистом, представляет собой свертку функции близости с дозой экспонирования.

Распространенным решением ЭБ является модификация дозы экспонирования с учетом ЭБ, с использованием итерационную схемы со стандартными уравнениями и с уравнением, предложенным Вотсоном. Для успешной коррекции нужно точно определить параметры α, β и η для конкретного образца.

В работе изучался эффект близости при формирования методом ЭЛЛ ФК на основе кремний на изоляторе (КНИ). На подложке (КНИ) методом ЭЛЛ создан наноразмерный рисунок в позитивном резисте (полиметилметакрилате) из упорядоченных массивов однородных по размеру отверстий в широком диапазоне размеров и периодов. Получены зависимости распределения размеров отверстий в резисте от параметров экспонирования: периода в массиве, дозы, размера поля рисования без перемещения стола.

Определены коэффициенты для коррекции эффекта близости для $\Phi K \alpha$, β , η . Показано, что минимальное стандартное отклонение от среднего значения радиуса элементов в массиве равному радиусу, заданному в шаблоне, достигается при коррекции ЭБ с использованием коэффициентов β и η , полученных экспериментально, и итерационного уравнения, предложенного Вотсоном.

ПОДВИЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОНОВ В НАНОМЕТРОВЫХ СЛОЯХ КНИ В УСЛОВИИ ОБОГАЩЕНИЯ

Э. Г. Кулубаева, О. В. Наумова, Б. И. Фомин, В. П. Попов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск

В настоящее время огромный интерес представляют широкий класс приборов на основе тонких слоев кремний-на-изоляторе (КНИ), работающих в режиме обогашения. К таким приборам, в частности, относятся беспереходные транзирешающие проблему коротко-канальных эффектов. сторы. и КНИнанопроволочные транзисторы, используемые в качестве различного рода химических или биологических сенсоров. Как и в обычных МОП транзисторах в таких приборах важны свойства систем Si/SiO₂, под которыми подразумеваются свойства нанометровых слоев Si, окружающих Si диэлектриков и свойства границ раздела Si/SiO₂. Подвижность носителей заряда является одним из основных параметров, который зависит от вышеперечисленных свойств систем Si/SiO₂ и определяет параметры приборов.

В нанометровых слоях КНИ потенциалы гетерограниц Si/SiO₂ являются взаимозависимыми. Поэтому для приборов на нанометровых слоях КНИ значения подвижности носителей заряда определяется влиянием двух границ раздела Si/SiO₂ (в отличии от МОП- транзисторов на объемном кремнии с одной гетерограницей Si/SiO₂).

Целью данной работы являлось исследование подвижности носителей заряда в тонких слоях КНИ при различных состояниях поверхностного слоя кремния. Для этого использовались планарные двузатворные КНИ МОП транзисторы, работающие в режиме обогащения. Состояния отсеченного слоя кремния со стороны поверхности контролировались в широком диапазоне (от обогащения до инверсии) напряжением на верхнем затворе. Получены зависимости подвижности электронов в обогащении µ от избытка носителей заряда N_e в канале транзисторов. Показано, что зависимости µ(N_e) могут быть аппроксимированы степенной зависимостью µ(N_e)~ N_e⁻ⁿ. Установлено, что значения показателей п варьируются от 0.2 до 0.5 при изменении состояния слоя КНИ со стороны поверхности от инверсии до обогащения. Обсуждаются механизмы рассеяния, соответствующие различным значениям n.

Генерация второй гармоники излучения инфракрасного фемтосекундного лазера в наноструктуре с асимметричными квантовыми ямами

Г.М. Борисов, В.Г. Гольдорт, С.А. Кочубей, А.А. Ковалёв, Д.В. Ледовских,

Н.Н. Рубцова, В.В. Преображенский, М.А. Путято, Б.Р. Семягин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, 630090, проспект Академика Лаврентьева,13

тел: (383) 333-2769, факс: (383) 333-2771, эл. почта: <u>gennadiy.m.borisov@gmail.com</u>

Эксперименты проводились с излучением лазера Yb^{3+} : $KY(WO_4)_2$ в режиме самосинхронизации мод со средней мощностью 0,2 Вт, с частотой следования импульсов 80 МГц, длительностью импульса около 400 фс, с длиной волны излучения 1040 нм. Использованы две схемы генерации второй гармоники (SH): на пропускание (углы падения от 10° до 80°) и на отражение (угол падения 45°).

Прошедшее через образец (или отражённое от него) излучение накачки и второй гармоники проходили через линзовый коллиматор и через призму для отделения излучения накачки. Затем излучение второй гармоники модулировалось прерывателем, фокусировалось на ФЭУ-79 и регистрировалось синхронным детектором.

Образец, сконструированный согласно идее [1] и выращенный методом молекулярной эпитаксии, содержал 40 периодов асимметричных квантовых ям (AQW) вида AlAs/In_{0.22}AlAs/In_{0.22}GaAs/AlAs на сингулярной подложке (001) GaAs. Структура AQW, в основном, прозрачна для излучения первой и второй гармоники, подложка GaAs поглощает излучение второй гармоники. Измерения проводились для обеих сторон образца для сравнения эффективностей генерации второй гармоники слоем AQW и подложкой.

Исследовалась зависимость от азимутального угла сигнала второй гармоники для линейно поляризованной накачки s и p типа для AQW и для подложки. Обнаружено, что для p-поляризованной накачки сигнал SH от слоя AQW втрое превышает сигнал SH от подложки как в геометрии на пропускание, так и на отражение. Во всех случаях вид азимутальной зависимости сигнала второй гармоники свидетельствует о существенном вкладе поверхности и, возможно, поверхностей раздела в структуре AQW.

Литература

1. J. Khurgin // Phys. Rev. B 1988, V. 38, PP 4056-4066.

Донорный фон в эпитаксиальных структурах CdHgTe

И.И. Ижнин ^{1,2)}, А.В. Войцеховский ²⁾, А.Г. Коротаев ²⁾, Е.И. Фицыч ³⁾,

С.А. Дворецкий⁴⁾, В.С. Варавин⁴⁾, Н.Н. Михайлов⁴⁾, М.В. Якушев⁴⁾, К.Д. Мынбаев

¹ Научно-производственное предприятие «Карат, Львов, 79031, Стрийская, 202

² Национальный исследовательский Томский госуниверситет, Томск, Ленина, 36

³ Академия сухопутных войск им. П.Сагайдачного, Львов, 79012, Гвардейская, 12

⁴ ИФП им. А.В.Ржанова СО РАН, Новосибирск, 630090, ак. Лаврентьева, 13

⁵ ФТИ им. А.Ф.Иоффе, С.Петербург, 194021, Политехническая, 26

тел: (+38032) 263-1065, факс: (+38032) 294-9735, эл. почта: <u>i.izhnin@carat.electron.ua</u>

Исследование донорного фона (ДФ) в твердых растворах CdHgTe (КРТ) является важной задачей с точки зрения разработки технологии получения материала и приборов на его основе. Под ДФ принято понимать суммарную концентрацию остаточных (неконтролируемых) донорных примесей и собственных донорных дефектов. На практике за концентрацию ДФ принимают концентрацию электронов в образцах *n*-типа проводимости с низким уровнем компенсации, что требует, в свою очередь, разработки соответствующих методов приведения образцов к низкому уровню компенсации.

В ходе проведения широкого круга исследований авторами было показано [1, 2], что наиболее эффективным методом снижения компенсации в КРТ является применение низкоэнергетической ионной обработки (НИО). В результате НИО кристалл пересыщается междоузельной ртутью, которая полностью аннигилирует вакансии ртути (собственные акцепторы), и образует донорные комплексы и центры со всеми наиболее известными акцепторными примесями в КРТ (As, Sb, Cu, Ag, Au и др.). После прекращения НИО эти комплексы распадаются в процессе релаксации даже при комнатной температуре, и после окончания релаксации, концентрация электронов адекватно отображает ДФ.

Предложенная методика была использована для исследования ДФ в эпитаксиальных пленках КРТ, полученных методами молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ), газофазной эпитаксии из паров металлоорганических соединений (ГФЭ МОС) в различных организациях. Показано, что наиболее низким ДФ (на уровне $3 \cdot 10^{14}$ см⁻³) обладают МЛЭ пленки на подложках Si (ИФП) и ЖФЭ пленки (ОАО «Гиредмет»). Для МЛЭ пленок на подложках GaAs (различных производителей) величина ДФ является значительно более высокой (на уровне $3 \cdot 10^{15}$ см⁻³). Аналогичная величина ДФ была характерна и для ГФЭ МОС пленок на подложках GaAs (VIGO Systems). Обсуждаются возможные причины наблюдаемых особенностей.

1. M.Pociask, I.I.Izhnin, S.A.Dvoretsky et.al. // Semicond. Sci. Technol. 2010. Vol. 25, N 2, 065012 (5pp).

2. I.I.Izhnin, A.I.Izhnin, H.V.Savytskyy et.al. // Semicond. Sci. Technol. 2012. Vol. 27, N 3, 035001 (4pp).

Схемотехнические решения построения устройств считывания сигналов для гибридных ИК ФПУ на основе ПЗИ элементов.

И.И. Ли

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, 630090 Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13, эл. почта: <u>irlamlee@isp.nsc.ru</u>

В 70-80 годах XX века интенсивно велись работы по созданию интегральных ИК ФПУ на основе МДП структур [1]. С освоением технологии сборки кристаллов на индиевых микростолбах, основное внимание стали уделять фотодиодам на узкозонных полупроводниковых материалах [2]. Нам удалось показать, что в спектральном диапазоне до 3.5 мкм МДП фотоприемники позволяют реализовать гибридные ИК ФПУ, тепловизионные системы с NETD близким к теоретическому пределу [3].



Рис. 1. Расчетные зависимости NETD (λ) и зарядовой емкости мультиплексора в качестве параметра. Кривая 1 соответствует апертуре (F/D = 1.32), 2- апертуре (F/D=1). Кривые 1, 2 получены при зарядовой емкости мультиплексора 5 10⁹, 3 - 5 · 10⁶, 4 - 5 · 10⁷ электронов.

Как видно из кривых 1, 2 зависимости NETD (λ) при зарядовой емкости мультиплексора 5 10⁹ соответствует известным зависимостям NETD(λ) для "идеального" тепловизора, в котором устройство считывания имеет неограниченную зарядовую емкость: - NETD(λ) улучшается с ростом λ .

Зарядовая емкость равная $5 \cdot 10^6$ электронов соответствует зарядовой емкости InAs ПЗИ элементов с площадью 1.6 10^{-4} см². Характер зависимостей NETD(λ) кардинально меняется, если расчеты проводить при условии ограниченной зарядовой емкости устройства считывания, кривые 3, 4. В этом случае с увеличением λ - NETD ухудшается. Лучшее NETD тепловизионной системы достигается в том спектральном диапазоне, в котором зарядовая емкость устройства считывания, либо зарядовая емкость для ПЗИ элемента при времени накопления равном времени кадра соответствует уровню фонового излучения. Для ПЗИ фотоприемников при комнатных температурах фона это условие выполняется в узком спектральном диапазоне до 3.5 мкм.

Так как ИФП СО РАН является единственной организацией, занимающейся разработкой гибридных многоэлементных ИК ФПУ на основе ПЗИ фотоприемников, то необходимо было разработать принципы считывания фотосигналов с ПЗИ фотоприемников. В работе дается описание, устройств считывания для многоэлементных ИК ФПУ линейчатого и матричного типов [4], ФПУ для регистрации координаты и времени поступления отраженных от объекта импульсных оптических сигналов, необходимых в системах лазерной локации на основе матрицы InAs ПЗИ элементов [5].

- 1. Приборы с зарядовой связью. Под ред. Д.Ф.Барба, М.:Мир, 1982 г.
- 2. Рогальский А. Инфракрасные детекторы. Новосибирск: Наука, 2003.
- 3. А.П. Ковчавцев, Г.Л.Курышев, и др. Фотоприемники зарядовой инжекции на арсениде индия, в кн. Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона. Новосибирск, 2001, с.10 – 118.
- 4. И.И. Ли, В.М. Базовкин и др. // Автометрия, 2007, т.43, в. № 4, с. 25 35.
- 5. И.И. Ли, В.М. Базовкин и др. // Прикладная физика, 2007, №2, стр. 67-72.

ИК фотоприемый модуль на основе многослойных гетероструктур GaAs/AlGaAs с квантовыми ямами

<u>Д. Г. Есаев</u>, А. И. Торопов, Н. А. Валишева Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН 630090 Новосибирск, пр. Акад. Лаврентьева, 13 Тел./факс: (383) 330-90-29, эл. почта: <u>esaev@isp.nsc.ru</u>

В работе приведены результаты работы по разработке ИК фотоприемного модуля на основе многослойных структур GaAs/AlGaAs с квантовыми ямами.

Фоточувствительные структуры изготавливались методом молекулярнолучевой эпитаксии на установке "Compact 21T". Расчетная толщина слоев GaAs и состав барьеров AlGaAs выбирались таким образом, чтобы второй уровень в квантовой яме находился ниже края зоны проводимости AlGaAs. Толщина квантово-размерных слоев GaAs составляла 19 монослоев GaAs. Толщина барьерных слоев AlGaAs - 47нм.

Фоточувствительные меза-структуры и дифракционная решетка изготавливались комбинированным способом – плазмохимическим и жидкостным трав-



лением. Фрагмент матрицы фотоприемников и отдельный пиксель с дифракционной решеткой показаны на рисунке.

Технические характеристики фотоприемного модуля:

Пик максимальной чувствительности, мкм	
Формат	
Шаг в матрице приемников, мкм	
Рабочая температура, К	
Дефектных элементов, %	
Температурное разрешение, мК	





Гистограмма распределения эквивалентной шуму разности температур по элеметам фотоприемного модуля и пример теплового изображения.

Разработка конструкции мозаичных неохлаждаемых микроболометрических приемников инфракрасного и терагерцового спектральных диапазонов форматом до 3072×576 и более

М.А. Демьяненко¹⁾, <u>Д.Г. Есаев</u>¹⁾, А.Г. Клименко¹⁾, А.И. Козлов¹⁾, И.В. Марчишин¹⁾, А.Р. Новоселов²⁾, В.Н. Овсюк¹⁾
¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск, 630090, пр-т Акад. Лаврентьева, 13
² Новосибирский филиал ИФП СО РАН "Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники" (КТИ ПМ), г. Новосибирск, 630090, пр-т Акад. Лаврентьева, 2/1
тел: (383) 333-1954, факс: (383) 333-2771, эл. почта: kozlov@isp.nsc.ru

Наиболее перспективным путем кардинального увеличения формата матричных микроболометрических приемников (ММБП) изображений инфракрасного (ИК) и терагерцового (ТГц) спектральных диапазонов является мозаичный принцип построения, при котором несколько кристаллов субмодулей ММБП меньшего формата устанавливаются стык в стык друг другу на общем основании (рис.) [1].



Синтезированы конструкция мозаичного фотоприемника (МФП) и схема его блока адресации (БА), обеспечивающие минимизацию топологической области 30НЫ» ΜΦΠ. «слепой например. при технологии 0,5 мкм КМОП 1Р 3М до 20 мкм для фоточувствительных элементов (ФЧЭ) с шагом 100 мкм в ТГц спектральном диапазоне и до 26 мкм для инфракрасных ФЧЭ с шагом 51 мкм [2].

Применение полученных экспериментальных (в плане разработки конструкции, технологии, принципиальной схемы и топологии) результатов создании при микроболометрических ΜΦΠ форматом 3072×576 на основе субмодулей

размерностью 384×288 обеспечивает в ИК диапазоне эффективность преобразования изображений более 99%, а в ТГц диапазоне эффективность преобразования может достигать 100% [1].

Литература

1. М.А. Демьяненко, Д.Г. Есаев, А.Г. Клименко, А.И. Козлов, И.В. Марчишин, А.Р. Новоселов, В.Н. Овсюк. Успехи прикладной физики. 2014. Т.2, вып.2. С.123-130.

2. М.А. Демьяненко, А.И. Козлов и др. Заявка на патент РФ № 2013132041. Положительное решение от 22.05.2014 г.

Исследование влияния структуры кремниевого мультиплексора и параметров матрицы детекторов инфракрасного диапазона на характеристики фотоприемников

М.А. Демьяненко, <u>Д.Г. Есаев</u>, А.И. Козлов, И.В. Марчишин, В.Н. Овсюк Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН (ИФП СО РАН), г. Новосибирск, 630090, пр-т Акад. Лаврентьева, 13 тел: (383) 333-1954, факс: (383) 333-2771, эл. почта: <u>kozlov@isp.nsc.ru</u>

Рассмотрены особенности построения кремниевых мультиплексоров для многоэлементных ИК фотоприемников (ИК ФП). Матричный мультиплексор с кадровым накоплением (ММКН) состоит из матрицы ячеек считывания фотосигналов и системы коммутации сигнала каждой ячейки на выход, при этом каждая ячейка содержит интегратор. В матричном мультиплексоре с построчным накоплением (ММПН) интегратор расположен в каждом столбцовом канале считывания [1].

Проведена оценка эквивалентной шуму разности температур (NETD) ИК $\Phi\Pi$ для комбинаций ММКН, ММПН и детекторов на основе соединения кадмий - ртуть - теллур (КРТ) и многослойных структур с квантовыми ямами. Оценка значений NETD получена как отношение шума U_n системы «фоточувствительный элемент - мультиплексор» к температурной чувствительности ИК фотодетектора.

$$U_{n} = \sqrt{\left(\frac{4kT}{R_{\text{det}}} + 2qI_{\text{inp}}\right)\frac{\eta_{\text{inj}}^{2}t_{\text{int}}}{2C_{\text{int}}^{2}} + \frac{4kTC_{\text{inp}}}{3C_{\text{int}}^{2}} + \int_{\Delta f} \frac{t_{\text{int}}^{2}}{R_{\text{det}}^{2}C_{\text{int}}^{2}} \left(\frac{8kT}{3g_{m}} + \frac{A_{m}}{f^{\alpha}}\right)df + \frac{kT}{C_{\text{int}}} + \int_{\Delta fa} \left(\frac{8kT}{3g_{ma}} + \frac{A_{a}}{f^{\alpha}}\right)df ,$$

где R_{det} - дифференциальное сопротивление детектора, I_{inp} - ток детектора, C_{inp} - емкость входного узла, η_{inj} - коэффициент инжекции тока детектора, C_{int} - емкость



накопления, t_{int} - время накопления, g_m - крутизна входного транзистора, g_{ma} - крутизна активного транзистора усилительного каскада, A_m и A_a - спектральные плотности шумов входного и усилительного транзисторов на частоте 1 Гц, Δf и Δf_a - полосы пропускания инте-гратора и усилительного каскада.

Исследованы зависимости NETD для ИК ФП на основе разных мультиплексоров 11,5 Длина волны максимума спектральной чувствительности, мкм ОТ параметра R_0A , характеризующего детекторов, размера ячейки матрицы, квантовой уровень технологии эффективности и длины волны максимума спектральной чувствительности фотодетекторов. Преимущества ММПН в длинноволновом спектральном ИК диапазоне для КРТ фотодиодов (ФД) демонстрирует рис.

На основе проведенных исследований в ИФП СО РАН создаются мультиплексоры, обеспечивающие изготовление ИК ФП для спектральных диапазонов 8-14 и 3-5 мкм с температурным разрешением на уровне мировых образцов.

Литература

1. В.В. Васильев, А.И. Козлов, И.В. Марчишин, Ю.Г. Сидоров, М.В. Якушев. Оптический журнал. 2014. Т.81, вып.7. С.39-45.

Выращивание и исследование варизонных слоев твердых растворов на основе антимонида галлия

<u>Р В Левин</u>^{1,2}, Д.Ю. Казанцев¹, Б В Пушный^{1,2} ¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая, 26, Россия; ² НТЦ микроэлектроники РАН, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26, Россия; тел: (812) 297-5169, факс: (812) 297-8640, эл. почта: <u>Lev@vpegroup.ioffe.ru</u>

В настоящее время солнечные батареи на основе тонкопленочного кремния имеют максимальный коэффициент полезного действия (КПД) ~ 20 %, а сложные в изготовление многопереходные фотоэлектрические преобразователи на основе соединений $A^3B^5 \sim 44,7$ %. Одним из возможных вариантов повышения эффективности фотоэлектрических преобразователей, является использование плавных гетероструктур, в которых ширина запрещенной зоны увеличивается к освещаемой поверхности.

Еще в 1957 году в теоретической работе [1] было показано, что в плавной гетероструктуре при больших уровнях освещенности возникает фотоэдс, близкая к перепаду ширины запрещенной зоны. В такой гетероструктуре происходит уширение спектральной характеристики фоточувствительности и более полное использование энергии солнечного света[2]. Целью нашей работы являлось разработка технологии получения структур с изменяющейся шириной запрещенной зоны, методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений.

В качестве модельного материала для таких структур был выбран твердый раствор AlGaInAsSb на основе антимонида галлия (GaSb), так как параметр решетки антимонида галлия совпадает с параметрами твердых растворов в большом диапазоне изменения ширины запрещенной зоны (0.3 - 1.7 эВ). Получение эпитаксиальных слоев твердых растворов на подложках GaSb осуществлялось на установке AIX200. Передэпитаксиальная подготовка подложек GaSb и условия роста были аналогичны указанным в работе [3]. Рассогласование полученных слоев с подложкой, для всех твердых растворов лежало в диапазоне \pm (0.01 - 0.1) %, а полуширина кривой ка

Были определены технологические режимы выращивания структур с изменением ширины запрещенной зоны по заданному закону, величину электрического поля можно изменять посредствам изменения состава и диапазона изменения Eg. Были получены образцы со встроенным полем в диапазоне 0.08 - 0.85 В/мкм.

Были изготовлены лабораторные структуры фотоэлектрического преобразователя с различным градиентом ширины запрещенной зоны варизонного слоя. Напряжение отсечки полученной структуры составило U = 0.5 B(77 K) при Eg = 0.4 эВ в области p-n перехода, что свидетельствует об увеличение напряжения за счет градиента ширины запрещенной зоны.

Работа была выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 12-08-00219 и президиума РАН (тема 9А32).

Литература

[1] J Tauc. Rev. Moden Phys., 29, N 3, 308 (1957).

[2] Ж И Алферов, В М Андреев, В И Корольков, Н Рахимов, Т С Табаров. Письма в ЖТФ, **4**, 7, 369 (1978).

[3] Р.В.Лёвин, А.С.Власов, Н.В.Зотова, Б.А.Матвеев, Б.П. Пушный, В.М.Андреев, ФТП, **40**, 1427 (2006).

МДП КРТ – фотодиод с туннельно прозрачным слоем окисла

<u>В.Г. Кеслер</u>, А.А. Гузев, С.А. Дворецкий, Е.Р. Закиров, А.П. Ковчавцев, З.В. Панова, М.В. Якушев

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, г. Новосибирск, 630090, Пр.-т. Ак. Лаврентьева, 13, тел: (383) 330-7781, факс: (383) 330-5256, эл. почта: <u>kesler@isp.nsc.ru</u>

При создании фотоприемников ИК-излучения на основе твердых растворов $Cd_xHg_{1-x}Te$ одной из ключевых технологических операций является пассивация поверхности с целью уменьшения поверхностных паразитных токов утечки. В работе представлены результаты поисковых исследований, направленных на разработку новой технологии пассивации поверхности КРТ сверхтонкими диэлектрическими плёнками (~3нм). Исследованы характер и степень нарушения стехиометрии приповерхностного слоя плёнок КРТ при проведении различных технологических операций (химическое травление, отжиг в вакууме, окисление в плазме тлеющего разряда, напыление платины и диоксида алюминия). Продемонстрирована возможность прецизионного формирования в плазме на поверхности КРТ собственных окисных плёнок субнанометрового и нанометрового диапазона толщин. Показано, что сверхтонкие окисные слои (~ 1-2 нм) эффективно стабилизи-



руют поверхность КРТ: позволяют повысить порог термической стабильности образцов при нагреве в вакууме с 65° С до 120° С и предотвращают нарушение стехиометрии поверхности при напылении металлических контактов.

Аналогично полученным ранее результатам на структурах на основе InAs [1,2] МДП-структуры с туннельно прозрачными слоями оксида на КРТ характеризуются вольт-амперными зависимостями диодного типа и имеют хорошую чувствительность к засветке имитатором АЧТ с температурой полости 583 К (см. рис, 1- темновая кривая, 2 - 6 для диафрагм АЧТ (6, 8, 10, 12, 16 мм). Оценка обнаружительной способности (D*) по дробовому шуму темнового тока (квантовый выход полагался равным 0.5) для лучших структур с золотыми контактами соответствует величине ~ 5 $\cdot 10^{12}$ см $\Gamma q^{1/2}$ BT⁻¹

(при T = 78 K) и ~ 1^{-10¹¹} см Гц^{1/2}Вт⁻¹ (при T = 173 K). Для структур с платиновыми контактами D* при T = 78 K составила 4^{-10¹¹} см Гц^{1/2}Вт⁻¹. Таким образом, продемонстрирована возможность создания функционально нового фоточувствительного элемента на КРТ.

Работа выполнена при поддержке фонда РФФИ проект 13-07-12151 - офи-м.

- 1. В.Г. Кеслер и др. // Успехи прикладной физики. 2013, Т.1, № 2, С. 193-199
- 2. В.Г. Кеслер и др. // Автометрия. 2014, Т.50, № 1, С.105-115

Осцилляции тока в пленках диоксида ванадия как проявление пространственно-временной нестабильности тока вблизи фазового перехода полупроводник-металл

<u>С.Г. Бортников</u>, В.Ш. Алиев, И.В. Мжельский, И.А. Бадмаева Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск, 630090, пр. ак. Лаврентьева, 13 тел: (383) 330-85-91, эл. почта: <u>bortnik@isp.nsc.ru</u>

Диоксид ванадия широко применяется для регистрации и модуляции ИК- и терагерцового излучения. Материал проявляет сильно нелинейные электрические свойства при температурах близких к температуре фазового перехода полупроводник-металл. При этом возникает пространственно-временная нестабильность тока в материале, которая проявляется в осцилляциях тока (Рис.1). В настоящее время осцилляции тока в плёнках VO₂ находят практическое



быстродействующих применение в электрических переключателях И терагерцового модуляторах излучения. Времена переключения инициированного оптическим излучением достигают сотен фс, а электрическим током десятки нс. Однако, имеются трудности достижении в устойчивости работы таких модуляторов. управления характеристиками Для устройств VO₂-плёнок на основе

необходимо выяснение механизмов ответственных за осцилляции и понимание процессов, происходящих при их возникновении.

В существующих в литературе моделях переход полупроводник-металл при осцилляциях инициируется некоторой критической величиной напряженности электрического поля (voltage-triggering effect), без учета тепловых процессов в материале. Эти модели опираются на предположение о моттовском механизме



фазового перехода. Однако имеется большое количество экспериментальных фактов, которые нельзя объяснить в рамках этой модели. Прежде всего, это касается эффектов, связанных с тепловыделением в плёнках VO₂.

Наши исследования показали, что тепловые эффекты играют важную роль при осцилляциях, и фазовый переход при осцилляциях обусловлен структурным перехо-

дом Пайерлса, а существующие модели не верно описывают процесс осцилляций. Пространственно-временная нестабильность протекания тока в диоксиде ванадия возникает из-за разогрева полупроводника электрическим током до температур близких к температуре фазового перехода, сопровождающимся шнурованием тока в материале (Рис.2).

Гетероструктуры HfO₂/Si/GaAs(001) для оптических спин-детекторов

В.А. Голяшов¹⁾, В.В. Преображенский¹⁾, М.А. Путято¹⁾, Б.Р. Семягин¹⁾, Д.В. Дмитриев¹⁾, А.И. Торопов¹⁾, М.С. Аксенов¹⁾, Н.А.Валишева¹⁾, И.П. Просвирин²⁾, А.В. Калинкин²⁾, В.И. Бухтияров²⁾, А.В. Бакулин³⁾, С.Е. Кулькова³⁾, О.Е. Терещенко^{1,4)} ¹ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, 630090, пр. Лаврентьева, 13 ² Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирск, 630090, пр. Лаврентьева, 5 ³ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, 634021, пр. Академический, 2/4. ⁴ НГУ, Новосибирск, 630090, ул. Пирогова, 2 тел: (913) 200-2603, эл. почта: vladimirgolyashov@gmail.com

Граница раздела ферромагнетик/диэлектрик/GaAs представляет интерес в связи с возможностью создания на ее основе оптических 3D детекторов спина свободных электронов с пространственным разрешением. При инжекции свободных электронов такую структуру тонкий (5-10 нм) намагниченный слои ферромагнетика и туннельно-прозрачный слой диэлектрика могут выполнять роль фильтра электронов по спину, а GaAs – роль оптического детектора электронов (вследствие катодолюминесценции). Для создания таких устройств требуется решить проблему высокой плотности поверхностных состояний (ПС) на границе раздела диэлектрик/GaAs. Известно, что плотность ПС можно уменьшить путем пассивации поверхности GaAs псевдоморфным слоем кремния [1] использованием стабильного на Si диэлектрика, например, оксида гафния HfO₂, который также может проявлять ферромагнитные свойства [2]. Целью данной работы являлось создание границы раздела HfO₂/GaAs с низкой плотностью ПС с использованием интерфейсного слоя кремния, изучение химического состава, электрофизических и магнитных свойств полученной границы раздела.

Исследовались границы раздела, полученные путем электронно-лучевого распыления HfO_2 на поверхность МЛЭ-структур 6ML Si/GaAs(001). Показано, что граница раздела $HfO_2/Si/GaAs(001)$ является атомно-гладкой с аморфным слоем HfO_2 . В зависимости от условий напыления пленки HfO_2 возможно формирование как резкой границы раздела HfO_2/Si , так и границы раздела $HfO_2/SiO_x/Si$. В МДП-структурах Au/HfO_2/6MLSi/n-GaAs(001) получена плотность ПС $6 \cdot 10^{11} \div 3 \cdot 10^{12}$ эВ¹ см⁻². Слои HfO_2 проявляли слабые ферромагнитные свойства. Были произведены расчеты из первых принципов атомной и электронной структуры поверхности Si/GaAs, которые показали уменьшение плотности ПС на интерфейсе Si/GaAs.

- 1. H. Hasegawa, et.al. Jap. Journal of Applied Physics 27, 1988, Issue 12, p. 2265.
- 2. J. M. D. Coey, et.al. Phys. Rev. B 72, 2005, 024450.
Фотопроводимость 2DEG AlGaAs/GaAs мезатруктур зигзагообразной формы

О.А. Шегай, О.Р. Баютова, А.К. Бакаров

Институт физики полупроводников СОРАН, пр. Лаврентьева, 13, г.Новосибирск, 630090, Россия тел: (383)330-67-33, факс: (383)333-27-71, эл. почта: <u>shegai@thermo.isp.nsc.ru</u>

В работе сообщается об исследовании фотопроводимости (ФП) мезаструктур зигзагообразной формы с 2-мерных электронным газом (2DEG) AlGaAs/GaAs в зависимости от интенсивности межзонной подсветки при различных температурах (Т) и смещениях (U). Измерения были выполнены на структурах с 2DEG с холловскими параметрами при 77К: n = 2.48×10^{11} см⁻² и $\mu = 1,63 \times 10^5$ см²/Вс. Исследуемые мезаструктуры зигзагообразной формы с различной шириной проводящего канала были получены методом фотолитографии и имели две контактные области (1х1мм²) на расстоянии около 1 мм.

Измерения, выполненные на исходной структуре с 2DEG показали лишь монотонный рост ФП с интенсивностью подсветки в широком диапазоне Т и U. В ФП исследуемых мезаструктур зигзагообразной формы наблюдается целый ряд особенностей: ступенчатый рост и спад ФП, резонансная ФП, осцилляции и флук-



Рис. 1. Зависимость ФП от интенсивности подсветки мезаструктуры зигзагообразной формы с 2DEG: U=13-19 B, w=5 мкм, T=45K.

туации ФП при различных Т и U. Типичное поведение для большинства структур в области высоких Т показано на рис.1, где видно, что ФП при некоторой интенсивности подсветки, зависящей от U, резко спадает. Анализ показал, что в области малых интенсивностей ΦП обусловлена ФП буферного слоя структуры, а в области больших - ФП 2DEG мезаструктур, сопротивление которой из-за геометрического фактора возрастает примерно в 2.5x10³ раза по сравнению с исходным 2DEG. В области низких Т в ФП наблюдаются выше пере-

численные особенности, сильно зависящие как от U и T, так и от ширины проводящего канала 2DEG.

Обсуждаются возможные механизмы наблюдаемых особенностей ФП AlGaAs/GaAs структур с 2DEG зигзагообразной формы.

Влияние стационарного рентгеновского излучения на свойства границы сращивания структур «кремний на изоляторе» со скрытым диэлектриком, модифицированным имплантацией ионов примеси

<u>Н.Д. Абросимова</u>, А.Г. Гаранин, М.Н. Минеев ФГУП «ФНПЦ НИИИС им.Ю.Е.Седакова, г.Нижний Новгород, 603137, ул.Тропинина, 47 тел: (831) 4697-5508, факс: (831) 466-6769, эл. почта: <u>mmineev@niiis.nnov.ru</u>

Целью работы являлось исследование поведения поверхностных состояний, создаваемыми примесными ионами в скрытом диэлектрике на границе сращивания структур «кремний на изоляторе», при воздействии стационарного рентгеновского излучения.

Исследования проводились методами псевдо-МДП транзистора [1] и вольт-амперных характеристик (BAX).

Объектами исследования являлись кольцевые тестовые структуры для измерений методом псевдо-МДП транзистора и транзисторные структуры МОП различной конфигурации канала (длина, ширина 1,6 мкм, 2,2 мкм, 50 мкм) на пластинах «кремний на изоляторе» (КНИ) со скрытым диэлектриком, имплантированным ионами F^+ , N^+ , Si^+ , Ge^+ . В эксперименте использовались пластины КНИ производства ИФП СО РАН, г.Новосибирск, изготовленные по методу DeleCut.

Выходные и передаточные ВАХ транзисторных структур МОП и псевдо-МДП характеристики снимались до и после воздействия низкоэнергетического стационарного рентгеновского излучения. По полученным ВАХ оценивались флуктуации плотности поверхностных состояний с помощью методик, представленных в [1,2].

Получено, что наименьший разброс поверхностного потенциала и наибольшая стабильность при радиационно-термическом воздействии достигается для структур с диэлектриком, обогащенным кремнием, а также для азотированных структур с дозой имплантации 3.25×10^{15} см⁻².

Литература

1. S. Cristoloveanu, D. Munteanu, and M. Liu, "A review of the pseudo-MOS transistor in SOI wafers: Operation, parameter extraction, and applications," IEEE Trans. Electron Devices, vol. 47, no. 11, pp. 1018–1027, Nov. 2000.

2. Е.Н.Бормонтов и др. // ЖТФ. 2001. Т.71, вып. 2. С.61-66.

Исследование спектральных характеристик многослойных гетероэпитаксиальных структур КРТ

<u>А.В. Никонов</u>^{1,2)}, К.О. Болтарь^{1,2)}, И.Д. Бурлаков^{1,3)}, Н.И. Яковлева¹⁾

 ¹ ОАО «НПО «Орион», Москва, 111123, ш. Энтузиастов, 46/2 тел: (499) 374-4900, эл. почта: <u>orion@orion-ir.ru</u>
² МФТИ (Государственный университет), г. Долгопрудный, 141700, МО, Институтский пер., 9
³ МГТУ МИРЭА, Москва, 119454, просп. Вернадского, 78

Инфракрасная спектроскопия широко используется для исследования параметров многослойных гетероэпитаксиальных структур, применяемых для создания на их основе односпектральных и многоспектральных матричных фотоприемных устройств (МФПУ) второго и третьего поколения. Спектральные характеристики пропускания и отражения используются для определения параметров исходных гетероэпитаксиальных структур (ГЭС) твердых растворов кадмий-ртутьтеллур (КРТ), которые остаются одним из лучших материалов для МФПУ ИК диапазона спектра [1].

Разработана методика определения характеристик многослойных полупроводниковых структур по спектрам ИК пропускания. Построена теоретическая модель спектра пропускания, зависящая от коэффициента поглощения эпитаксиальных слоёв КРТ и ряда параметров структуры, основанная на матричном методе Абеля [2, 3]. Для вычисления спектров отражения и пропускания ГЭС КРТ установлена связь интенсивностей падающего и отраженного излучения с излучением, прошедшим образец, учитывая поглощение в каждом слое и многократные отражения от границ раздела между соседними слоями. В результате моделирования получены параметры многослойных ГЭС КРТ такие, как толщина слоев, коэффициенты преломления, состав и их архитектура.

Разработана методика расчета прогнозируемых характеристик спектральной чувствительности МФПУ на основе многослойных ГЭС КРТ. По экспериментальным характеристикам спектральной чувствительности проведена оценка длины диффузии неосновных носителей заряда, скорости поверхностной рекомбинации на границах раздела рабочих фоточувствительных слоев ГЭС КРТ. Данные расчетов находятся в хорошем соответствии с экспериментом.

Проведенные расчёты и экспериментальные исследования сложных структур, включающих в себя буферные и варизонные слои, предоставляют возможность совершенствования методик контроля многослойных ГЭС КРТ, необходимых для изготовления фотоприемных устройств нового поколения.

Литература

1. А.М. Филачёв, И.И. Таубкин, М.А. Тришенков. Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды. М.: Физматкнига, 2011. 448 с.

2. К.О. Болтарь, А.В. Никонов, Н.И. Яковлева // Прикладная физика. 2011. № 5. С.100-106.

3. F. Van de Wiele // Proc. IEEE. 1973. N61. P.793-794.

Процесс захвата дырок в гетероструктурах Ge/Si с квантовыми точками Ge.

<u>А.А. Блошкин</u>^{1,2)}, А. И. Якимов¹⁾, В.А.Тимофеев¹⁾, А. В. Двуреченский^{1,2)}.

¹ Институт физики полупроводников им А. В. Ржанова СО РАН,

Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 13.

² Новосибирский государственный университет,

Новосибирск, 630090, ул. Пирогова 2.

тел: (383) 333-2832, факс: (383) 333-2832, эл. почта: <u>bloshkin@isp.nsc.ru</u>

Методом спектроскопии адмиттанса определены сечения захвата и энергетические уровни дырок в гетероструктурах Ge/Si с квантовыми точками Ge, выращенных с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии. Установлено, что в слоях квантовых точек, полученных при низкой температуре роста $T_a \le 450^{\circ} C$, сечение захвата дырок в квантовые точки экспоненциально растет с увеличением энергии связи дырок (правило Мейера-Нельделя) с одинаковой, не зависящей от T_e характерной энергией ~25 мэВ. Традиционно выполнение правила Мейера-Нельделя связывают с многофоннонным процессом захвата носителей заряда на глубокие уровни[1]. Показано, что правило Мейера-Нельделя нарушается в структурах, выращенных при более высоких температурах, а также в образцах, подвергнутым обработкам в водородной плазме. При увеличении температуры отжига в плазме водорода происходит постепенный переход OT экспоненциального роста к экспоненциальному спаду сечения захвата дырок в зависимости от энергии уровня. Полученные результаты свидетельствуют о вкладе структурных дефектов в процесс захвата дырок на уровни в квантовых точках.

Литература

1. A. Yelon, B. Movaghar.//Phys.Rev.Lett., 1990, v. 65, №5, c. 618-620.

Ab initio study of oxygen and arsenic impurities on non-linear optical properties of β -Si₃N₄ material

E. Kutlu, P. Narin, G. Atmaca, B. Sarikavak Lisesivdin, S. B. Lisesivdin*

Gazi University, Faculty of Science, Department of Physics, 06500 Teknikokullar Ankara, Turkey. *Corresponding Author: <u>bora@gazi.edu.tr</u>

Silicon Nitride is used as anti-reflective coating material in silicon based solar cells. β -Si₃N₄ is in wurtzite crystal structure and therefore it is a promising candidate for a lattice matched anti-reflective coating material in GaN-based optical devices. However, possible impurity inclusion during the growth of β -Si₃N₄ can affected the desired optical properties of the optical device. In this study, wurtzite β -Si₃N₄ with space group P63m has been optimized for the As and O impurities with the lowest energy atom locations. Then, the electronic band structure and the dielectric tensor components of β -Si₃N₄ has been investigated by the first principle pseudo potential method using the density functional theory (DFT) with the local density approximation (LDA). With dielectric tensor, the effect of As and O impurities on frequency dependent dielectric constant, refractive index, absorptance and absorption coefficient are calculated.

Acknowledgements: This work is supported by TUBITAK under Project No 113F364.

Фотолюминесцентное исследование акцепторных состояний в гетероэпитаксиальных структурах CdHgTe, выращенных молекулярно-лучевой эпитаксией на подложках Si и GaAs

<u>К.Д. Мынбаев</u>¹⁾, И.И. Ижнин²⁾, А.И. Ижнин²⁾, Н.Л. Баженов¹⁾, А.В. Шиляев¹⁾, Н.Н. Михайлов³⁾, В.С. Варавин³⁾, М.В. Якушев³⁾, С.А. Дворецкий³⁾

> ¹ Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26 ² Научно-производственное предприятие «Карат», Львов, Украина, 79031, Стрыйская 202

¹ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, 630090, ак. Лаврентьева, 13 тел: (812) 292-7182, факс: (812) 297-1017, эл. почта: <u>mynkad@mail.ioffe.ru</u>

В последнее время эпитаксиальные слои твердых растворов CdHgTe, основных материалов инфракрасной фотоэлектроники, активно выращивают на гетероподложках, «альтернативных» традиционным подложкам из Cd(Zn)Te, и в первую очередь на подложках Si и GaAs. Для CdHgTe, выращенного на различных подложках, характерна специфическая дефектная структура, что проявляется, например, в различной плотности и поведении дислокаций в гетероэпитаксиальных структурах (ГЭС) CdHgTe/Si и CdHgTe/GaAs. Естественно ожидать, что такие материалы будут содержать и специфические точечные дефекты. В настоящей работе мы сообщаем об исследовании дефектов, ответственных за появление акцепторных состояний в ГЭС CdHgTe/Si и CdHgTe/GaAs, методом фотолюминесценции. ГЭС с однородным по составу *х* «рабочим» слоем CdHgTe с 0.30<*x*_a<0.39 были выращены в ИФП СО РАН методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на подложках (310) GaAs и Si с буферными слоями ZnTe и CdTe. Исследовались как номинально нелегированные ГЭС, так и структуры, легированные индием (донор в CdHgTe). Для детального исследования дефектно-примесной структуры материала изучались как as-grown ГЭС, так и образцы, подвергнутые различным видам пост-ростовой обработки: отжигу в атмосфере гелия или насыщенных парах ртути, ионной имплантации с активационным отжигом, циклическому отжигу для аннигиляции дислокаций, обработке низкоэнергетическими ионами.

В результате проведенных исследований установлена специфика акцепторных состояний в ГЭС, выращенных на подложках Si и GaAs. Так, например, показано, что как для нелегированных, так и легированных индием ГЭС CdHgTe/Si типичны мелкие уровни с энергиями залегания акцептора 10-11 мэВ и глубокие уровни с энергией 40 или 50-55 мэВ. Специфическими для ГЭС CdHgTe/GaAs, легированных индием, являются акцепторные центры с энергией залегания около 18 мэВ и 26 мэВ, в то время как нелегированные ГЭС, как правило, свободны от акцепторных состояний. Обсуждается природа выявленных акцепторных центров и возможная роль легирования материала индием в их формировании.

Электрофизическая диагностика параметров МДП-структур на основе гетероэпитаксиального HgCdTe, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии

<u>А.В. Войцеховский</u>¹⁾, С.Н. Несмелов¹⁾, С.М. Дзядух¹⁾, В.В. Васильев²⁾, В.С. Варавин²⁾, С.А. Дворецкий²⁾, Н.Н. Михайлов²⁾, М.В. Якушев²⁾, В.Д. Кузьмин²⁾, В.Г. Ремесник²⁾, Ю.Г. Сидоров²⁾

¹ Научно-исследовательский Томский государственный университет, Томск, 634050, пр.Ленина, 36 2 Институт физики полупроводников им. А.В.Ржанова СО РАН, Новосибирск, 630090, пр. ак. Лаврентьева, 13 тел: (3822)412-772, факс: (3822) 412-772, эл. почта: <u>vav@elefot.tsu.ru</u>

Представлены результаты диагностики параметров МДП-структур на основе МЛЭ HgCdTe при помощи измерений полной проводимости в широком диапазоне частот (1 кГц-2 МГц) и температур (8-300) К. Измерения проводились на автоматизированной установке спектроскопии адмиттанса наногетероструктур на базе неоптического криостата Janis и измерителя иммитанса Agilent E4980A.

МДП-структуры для исследований изготавливались на основе электронного и дырочного HgCdTe (x=0.19-0.36), выращенного методом МЛЭ на подложках из GaAs и Si. При выращивании гетероструктур с обеих сторон рабочего слоя создавались варизонные слои с повышенным компонентным составом CdTe. Для части структур проводилось предварительное удаление верхнего приповерхностного варизонного слоя путем травления поверхности. Исследование таких образцов позволяет определить влияние варизонных слоев на электрофизические свойства HgCdTe [1,2]. Исследованы характеристики МДПструктур на основе HgCdTe с неоднородным распределением состава (барьерными слоями, потенциальными и квантовыми ямами). Изучены электрофизические характеристики МДП-структур на основе *p*-HgCdTe после ионной имплантации, а также после ионно-лучевого травления.

При помощи метода полной проводимости в сильной инверсии исследованы дифференциальное сопротивление области пространственного заряда, время формирования инверсионного слоя, емкость инверсионного слоя. Измерения полной проводимости в режимах обеднения и плоских зон использованы для нахождения плотности фиксированного заряда, напряжения плоских зон, спектра поверхностных состояний, энергий глубоких уровнях в приповерхностном слое HgCdTe.

Литература

1. A.V.Voitsekhovskii et al. // Opto-Electron. Rev. 2010. V.18, No.3, P. 259-262.

2. A.V.Voitsekhovskii, S.N. Nesmelov and S.M. Dzyadukh // Thin Solid Films. 2014. V.551. P. 92-97.

Магнитотранспорт в двумерном электронном газе на поверхности спирали в квантующих магнитных полях

<u>Ю.С. Воробьёва</u>¹⁾, А.Б. Воробьёв¹⁾, В.Я. Принц¹⁾, А.И. Торопов¹⁾, D. Maude²⁾ ¹Институт физики полупроводников им. А.В.Ржанова СО РАН, Новосибирск, 630090, пр. ак. Лаврентьева, 13 ²Grenoble High Magnetic Field Laboratory, CNRS Grenoble, 25, rue des Martyrs, B.P. 166, 38042 Grenoble Cedex 9 тел: (383) 333-0699, эл. почта: <u>yukecheva@isp.nsc.ru</u>

В настоящей работе измерены магнитополевые зависимости продольного и холловского сопротивлений спирали с двумерным электронным газом при различных углах поворота; достигнуты режимы целочисленного и дробного квантового эффекта Холла. Наблюдалась сильная асимметрия продольного сопротивления по отношению к направлению магнитного поля. Рассмотрена схема краевых состояний для этой новой геометрии образцов и проведены вычисления в рамках формализма Бюттикера-Ландауэра.

- 1. ДЭГ на искривлённой поверхности представляет собой превосходную модельную систему для изучения транспорта электронов в условиях градиента магнитного поля. В квантующих магнитных полях неоднородность нормальной к поверхности компоненты магнитного поля приводит к пространственному искривлению уровней Ландау [1], что проявляется в магнитотранспортных характеристиках образца.
- 2. Спираль с высокоподвижным двумерным электронным газом получена направленным сворачиванием напряженной гетероструктуры, состоящей из In_{0.15}Ga_{0.85}As и квантовой ямы GaAs, окруженной модулировано легированной сверхрешеткой AlAs/GaAs [2]. Измерены магнитополевые зависимости продольного сопротивления спирали при различных углах поворота. Наблюдалась сильная асимметрия (>10⁴) продольного сопротивления [3]. Наблюдались минимумы продольного сопротивления и плато холловского сопротивления, соответствующие дробным факторам заполнения.
- 3. Проведен анализ осцилляций Шубникова-де Гааза при различных углах поворота спирали; показано, что с поворотом пик спектра Фурье сдвигается и уширяется, что объясняется уменьшением нормальной компоненты магнитного поля на образце и увеличением числа краевых каналов, дающих вклад в измеряемые сопротивления. В рамках формализма Бюттикера-Ландауэра рассчитаны магнитополевые зависимости, удовлетворительно согласующиеся с экспериментом.

Работа поддержана грантом РФФИ № 12-02-00918-а.

- 1. Л.И.Магарилл и др // Письма в ЖЭТФ. 1996. Т.64, вып. 6. С. 421-426
- 2. K.-J. Friedland et al // Phys. Rev. Lett. 1996. V. 77, 4616
- 3. A.B. Vorob'ev et al // Phys. Rev. B. 2007. V. 75, 205309

Фотолюминесценция в МКЯ-структурах КРТ МЛЭ

А.В. Войцеховский, Д.И. Горн

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, 634050, пр. Ленина 36

тел: (3822) 413-517, факс: (3822) 412-772, эл. почта: <u>vav@elefot.tsu.ru</u>

В ланной научной работе нами проведён анализ работ по фотолюминесценции структур Cd_xHg_{1-x}Te с множественными квантовыми ямами [1-8]. Большая часть из рассмотренных нами работ описывает эксперименты по наблюдению фотолюминесценции в структурах с множественными квантовыми ямами на основе КРТ с количеством периодов структуры от 4 до 50. Исключение составляют работы, в которых наряду с МКЯ-структурами рассматриваются также и одиночные квантовые ямы. В анализируемых работах рассматриваются структуры с различной шириной КЯ (от 2 до 50 нм) и различными составами материала ямы (от 0,24 до 0,45 мол. дол.) и барьеров (от 0,5 до 0,95 мол. дол.). В некоторых работах рассматривались структуры с инвертированной зоной (x < 0,16). Исследования данных структур были проведены при различных рабочих температурах (4-300 К).

Кроме анализа экспериментальных данных по получению фотолюминесценции также проведены оценочные расчёты энергий наблюдаемых пиков излучения в рассмотренных экспериментальных работах. Для анализа использовалась теоретическая модель, описанная в [9].

Во всех рассмотренных нами работах в спектрах излучения при оптической накачке наблюдали только одну полосу, связанную с различными типами переходов. Излучение наблюдалось при различных температурах – от 4 до 300 К. Следует указать, что во всех рассмотренных работах наблюдались только межзонные излучательные переходы. Сравнение экспериментальных данных, описанных в данной работе, с результатами проведённых расчётов подтверждают, что представленная физико-математическая модель обеспечивает хорошее согласование теории и эксперимента и может быть использована для моделирования оптических свойств структур КРТ с квантовыми ямами.

- [1] N.C.Giles, J.W.Han, J.W.Cook Jr. at al., Appl. Phys. Let. 55, 2026 (1989).
- [2] R.D.Feldman, C.L.Cesar, M.N.Islam at al., J.Vac.Sci.Technol.A 7(2), 431 (1989).
- [3] K.K.Mahavadi, S.Sivananthan, M.D.Lange at al., J.Vac.Sci.Technol, **8** (2), 1210 (1990).
- [4] E. Monterrat, L.Ulmer, N.Magnea at al., Semicond.Sci.Technol 8, S261 (1993).
- [5] C.R.Tonheim, E.Selvig, S.Nicolas, J.Physics: Conf.Series 100, 042024 (2008).
- [6] M.Breivik, E.Selvig, C.R.Tonheim, J.Physics: Conf.Series 100, 042041 (2008).
- [7] R.Haakenaasen, E.Selvig, C.R.Tonheim, J.Electron.Mater, DOI: 10.107//s11664-010-1211-7 (2010).
- [8] C.R.Tonheim, A.S.Sudbo, E.Selvig at al., IEEE Photon.Tech.Let. 23 (1), 36 (2011).
- [9] А.В.Войцеховский, Д.И.Горн, И.И.Ижнин и др., Изв. вуз.: Физика 8, 50 (2012

Длинноволновая фотолюминесценция в узкозонных эпитаксиальных пленках и структурах с квантовыми ямами на основе HgCdTe

<u>В.В. Румянцев</u>^{1,2)}, С.В. Морозов^{1,2)}, А.В. Антонов^{1,2)}, Д.И. Курицын^{1,2)}, К.Е. Кудрявцев^{1,2)}, А.М. Кадыков^{1,2)}, В.И. Гавриленко^{1,2)}, Н.Н. Михайлов³⁾, С.А. Дворецкий³⁾

¹ Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, 603950 ² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, 603950 ³Институт физики полупроводников им. А.В.Ржанова СО РАН, Новосибирск, 630090 эл. почта: rumyantsev@ipmras.ru

Работа посвящена изучению спектров и кинетики фотолюминесценции (ФЛ) в узкозонных эпитаксиальных пленках $Hg_{1-x}Cd_xTe$ (0.19<x<0.23) и гетероструктурах $Cd_yHg_{1-y}Te/Hg_{1-x}Cd_xTe$ с квантовыми ямами, выращенных с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке GaAs(013) [1, 2]. Интерес к данным системам вызван возможностью создания на их основе лазеров на диапазон 20 – 50 мкм, недоступном для приборов на основе материалов A3B5.



В эпитаксиальных пленках межзонная ФЛ обнаружена на длинах волн вплоть до 26 мкм (см. рис. 1), причем ширина линии стремится к 1.8kT с ростом Т. В структурах с КЯ (рис. 2) помимо излучательных переходов в КЯ (линия 1) и в барьерных слоях (линия 3) при 18К обнаружена узкая (~ 20 см⁻¹, линия 2) линия с длинной (~7 мкс) кинетикой, обусловленная излучательными переходами с состояний глубоких центров в барьерах. Время спада ФЛ в КЯ составляет до 5 мкс, что в несколько раз превосходит соответствующие значения для объемных образцов.

- 1. V.S. Varavin et al., Opto-electronics Review 11(2), 99–111 (2003)
- 2. S. Dvoretsky et al, Journal of Electronic Materials **39** (7), 918 (2010).

Надёжностные параметры кольцевого микрогироскопа с кремниевым резонатором

<u>С.С. Березуева</u>¹⁾, В.Н. Горошко¹⁾, Б.М. Симонов¹⁾, С.П. Тимошенков¹⁾ ¹ Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Москва, 124498, Зеленоград, проезд 4806, дом 5, e-mail: <u>serborsel@mail.ru</u>

Изготовлен кольцевой микрогироскоп (КМГ), резонатор (чувствительный элемент-ЧЭ) которого представляет собой кремниевое кольцо диаметром 6 мм, поддерживаемое восемью радиально упругими подвесами в виде ромбов. Подвесы непосредственно связаны (и фиксируются) основанием. Все элементы ЧЭ имеют вертикальные боковые стенки. КМГ включает в свой состав: ЧЭ (кольцо), воспринимающий воздействующую угловую скорость, расположенный на плате преобразователя, преобразователь электронный, расположенный на двух платах преобразователя, преобразующий перемещение чувствительного элемента в выходной сигнал. Конструкция выполнена в металлостеклянном корпусе. Было выполнено моделирование максимальных электрических нагрузок. Структурная схема надежности преобразователя угловой скорости (ПУС) (как системы) представляет собой последовательное (в смысле надёжности) соединение элементов (составных частей (СЧ)). Результаты моделирования интенсивностей отказов для условий эксплуатации при температуре окружающей среды +85°С большинства компонентов получены с использованием программы АСРН-2004, для ЧЭ использовалось значение интенсивности отказа из [1]. С учетом структурной схемы надежности, вероятность безотказной работы КМГ, в предположении экспоненциального распределения отказов и справедливости ограничений, накладываемых на простейший поток отказов, обладающий свойствами стационарности, ординарности и отсутствием последействия, определятся по формуле:

$$P(t) = \exp\left(-t\sum_{i=1}^n \lambda_i m_{ik} K_{\lambda i}\right),$$

где *t* – время работы, λ_i – базовое значение интенсивности отказов i-ого типа компонента, *n* – количество типов компонентов, *m_{ik}* – количество компонентов iго типа. Были определены интенсивность отказов изделия (КМГ) - 6,934*10⁻⁶ 1/час и найдено значение средней наработки на отказ T₀= 144206 час, а также гамма-процентная наработка до отказа при γ =90%:

$$T_{\gamma} = -\ln(\gamma) \times T_0 = 0,105361 \times 144206 = 15193,69 \, \mu ac$$

Полученные значения показателей надёжности вполне удовлетворительны, прибор можно использовать в аппаратуре с длительным сроком активного существования.

Литература

1. Тимошенков С.П., Заводян А.В., Симонов Б.М., Горошко В.Н. Оценка и обеспечение надёжности изделий микро- и наноэлектроники, микросистемной техники. Часть 1: учеб. Пособие. – М.: МИЭТ, 2012. – 288 с.: ил

Исследование структурных, оптических и электрических свойств частично восстановленных оксид графеновых пленок

С.А. Смагулова¹⁾, Г.Н. Александров¹⁾ П.В. Винокуров¹⁾, И.И. Куркина¹⁾, И.В. Антонова²⁾ ¹ Северо-Восточный федеральный университет им. М.К.Аммосова, Якутск, 677000, Белинского, 58 ² Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск 630090, пр. Лаврентьева, 13 тел: (4112) 496615, эл. почта: smagulova@mail.ru

Графен в окисленном состоянии можно синтезировать из графита путем химического расщепления. При этом получаемый материал представляет собой суспензию с отдельными монослойными листиками оксида графена, из которой путем удаления растворителя получают оксид графеновую пленку. Оксид графеновые пленки используется для создания электронных и оптоэлектронных компонентов [1] гибких биосенсоров, биоразлагаемых нанокомпозитов, антибактериальных медицинских бинтов [2].

С применением суспензий были получены оксид графеновые пленки на стекле толщиной 9 – 150 нм, свободно-висящие пленки площадью 2-3 см² на пластиковых рамках толщиной 200 – 400 нм и более толстые свободные (микронные) пленки, полученные с помощью анодисков. Проводились эксперименты по частичному восстановлению оксид графеновых пленок в парах гидразина. На полученных пленках были исследованы спектры комбинационного рассеяния света, структуры пленок с помощью сканирующего электронного микроскопа, электропроводность, спектры пропускания в УФ и видимой области излучения.

Обнаружено, что тонкие пленки имеют прозрачность до 98% и являются непроводящими (сопротивление ~10¹² Ом/□). Восстановление в парах гидразина уменьшает прозрачность до ~ 50 - 60% и увеличивает проводимость до ~10⁴ Ом/□. Показана возможность послойного восстановления оксид графеновых пленок. Предложен новый подход, позволяющий восстанавливать в парах гидразина только верхние слои оксид – графеновой пленки и создавать тонкопленочные структуры, включающие в себя проводящие и диэлектрические слои. Пленки перспективны для широкого спектра оптических и электронных приложений, включая гибкую электронику.

- 1. Eda G. and Chhowalla M. Chemically Derived Graphene Oxide: Towards Large-Area Thin-Film Electronics and Optoelectronics. Advanced materials. 2010. V.22, P. 2392-2415.
- 2. Hu W., Peng C., Luo W., Lv M., Li X., Li D., Huang Q., Fan C. Graphene-Based Antibacterial Paper. ACS Nano. 2010. V.4, P.4817.

Авторский указатель

A

A		חי יח	20 52 (1 70 01
Абрамкин Д.С.	37,59	Воицеховскии А.В.	38,53,64,79,81
Абросимова Н.Д.	74	Володин В.А.	57,58
Азаров И.А.	45	Воробьёв А.Б.	52,80
Аксенов М.С.	47,72	Воробьева Ю.С.	80
Александров Г.Н.	29,84	Высоцкая Н.А.	49 10
Алиев В.Ш.	71	Вьюрков В.В.	18
Алхимова М.А.	46	_	
Андреев Н.В.	56	Γ	
Антонов А.В.	82	Гавриленко В.И.	22,82
Антонов В.А.	36	Гаврилова Т.А.	39
Антонова И.В.	14,29,84	Гайслер А.В.	39
Анциферов А.П.	32	Гайслер В.А.	<i>39</i>
Армбристер В.А.	34	Гаранин А.Г.	74
Асеев А.Л.	19,39	Гольдорт В.Г.	63
		Голяшов В.А.	72
Б		Гончаров И.О.	46
Бадмаева И.А.	71	Горн Д.И.	81
Баженов Н.Л.	78	Горошко В.Н.	83
Базовкин В.М.	41	Грандэ П.	58
Бакаров А.К.	26.37.39.73	Грачев К.В.	39
Бакулин А.В.	72	Гребенькова Ю.Э.	56
Баютова О.Р.	73	Гузев А.А.	41,70
Березуева С.С.	83	Гутаковский А.К.	32,34,36,37
Бетеров И.И.	13,39		
Блошкин А.А.	76	Л	
Богданов Г.С.	46	Лвореикий С.А.	17.19.32.45.64.70.
Бобыль А.В.	31		78.79.82
Бойко А.М.	31	<i>Двуреченский А.В.</i>	34,48,76
Бойко М.Е.	31	Лемьяненко М.А.	67.68
Болтарь К.О.	75	Леребезов И. А.	39
Борисов Г.М.	63	Джаган В.М.	24
Бортников С.Г.	71	Дзядух С.М.	<i>79</i>
Брунев Л.В.	19	<i>Лмитриев Л.В.</i>	39.72
Буданиев М.В.	26	Луда Т.А.	24
Бунин А.	46		
Бурлаков И.Л.	20.75	Г	
Бухтияров В.И.	72		55
2)		Евстратов н.в.	33 42
R		Емельянов Е.А.	43
Β Βαύμρη Ε Γ	1)	Есаев Д.Г.	00,07,08 41
Βαπημορα Η Λ	14 11 17 66 70	Ефимов В.М.	41
Banaeuu RC	10 32 61 78 70		
Bacusto R R	19,52,07,70,77	Ж	
Building D.D.	50.81	Живодков Ю.А.	<i>39</i>
Бинокуров П.Б.	50,04	Жолудев М.С.	27

3

70
42
34

И

Игуменов А.Ю.	30
Ижнин А.И.	78
Ижнин И.И.	64 ,78
Икусов Д.Г.	32,52
Ишуткин С.В.	26

К

Кадыков А.М.	82
Казанцев Д.Ю.	69
Калагин А.К.	<i>39</i>
Калинкин А.В.	72
Качанова М.М.	<i>39</i>
Кеслер В.Г.	70
Кисель В.Э.	<i>43</i>
Клименко А.Г.	67
Климов А.Э.	<i>40</i>
Климовская А.И.	<i>49</i>
Ковалёв А.А.	43,63
Ковчавцев А.П.	41,70
Кожухов А.С.	<i>39</i>
Козлов А.И.	67,68
Конников С.Г.	31
Конфедератова К.А.	. <i>61</i>
Коротаев А.Г.	<i>64</i>
Корсак А.В.	<i>49</i>
Коханенко А.П.	53
Кочубей С.А.	63
Кудрявцев К.Е.	82
Кузьмин В.Д.	19,32,79
Кулешов Н.В.	<i>43</i>
Кулубаева Э.Г.	<i>62</i>
Кулькова С.Е.	72
Куприянов И.Н.	
1191121110011111	36
Курицын Д.И.	36 82
Курицын Д.И. Куркина И.И.	36 82 29,84
Курицын Д.И. Куркина И.И. Курочкин В.Л.	36 82 29,84 42

Л

Лактионов П.П.	44
Латышев А.В.	19,24,32,39
Ледовских Д.В.	63
Левин Р.В.	23,69

Ли И.И.	41,65
Лиходиевский В.В.	<i>49</i>
Лозовой К.А.	53
Луцишин И.Г.	<i>49</i>
Лямкина А.А.	28

Μ

Мардежов А.С.	32
Маричев А.Е.	23
Марчишин И.В.	19,67,68
Матюшкин И.В.	54,55
Медведев А.С.	39
Мелехов А.П.	46
Мжельский И.В.	41,71
Милехин А.Г.	24
Минеев М.Н.	74
Михлин Ю.Л.	30
Михайлов Н.Н.	17,19,32,45, 52,
	64,78,79,82
Морозов С.В.	82
Мощенко С.П.	28
Мудрый А.В.	34
Мутилин С.В.	52
Мынбаев К.Д.	64,78

H

Настовьяк А.Е.	41
Наумова О.В.	49,62
Небогатикова Н.А.	<i>29</i>
Неизвестный И.Г.	40,42
Ненашева Л.А.	<i>39</i>
Несмелов С.Н.	79
Никифоров А.И.	30
Никонов А.В.	75
Новиков П.Л.	<i>48</i>
Новоселов А.Р.	67
Номоконов Д.В.	60

0

Овсюк В.Н.	19,67,68
Орликовский А.А.	18
Отсуджи Т.	18

Π

Пальянов Ю.Н.	36
Панова З.В.	41,70
Парм И.О.	<i>19</i>
Паршин А.С.	30
Педченко Ю.Н.	<i>49</i>
Погосов А.Г.	26

Подлесный С.Н.	36
Половинкин В.Г.	41
Половодов П.А.	47
Пономаренко В.П.	20
Попов В.П.	36,58,62
Предеин А.В.	<i>19</i>
Преображенский В	.B. 43,63,72
Принц В.Я.	29,52,80
Прокопьев В.Ю.	45
Просвирин И.П.	72
Путято М.А.	43,63,72
Пушный Б.В.	23,69
Пчеляков О.П.	30
Пышный Д.В.	44

Р

Ремесник В.Г.	32,79
Родякина Е.Е.	24,61
Романов С.И.	44
Рубанов С.	36
Рубцова Н.Н.	43,63
Руденков А.С.	<i>43</i>
Румянцев В.В.	82
Рыжий В.И.	18
Рыхлицкий С.В.	32,45
Рябцев И.И.	13,39,42

С

C	
Сабинина И.В	19,32
Сандырев В.К.	39
Саранин А.А.	15
Camo A.	18
Сафронов Л.Н.	36
Свешникова Л.Л.	24
Свинцов Д.А.	18
Свиташев К.К.	19,32
Семенова О.И.	39
Семягин Б.Р.	43,63,72
Сидоров Г.Ю.	19,32
Сидоров Ю.Г.	19,32,45,79
Симонов Б.М.	83
Смагина Ж.В.	<i>48</i>
Смагулова С.А.	29,50,84
Соколов А.Э.	56
Coomc P.A.	52
Спесивиев Е.В.	32,45
Суслов А.В.	17
Сусляков А.О.	19
~	

Т

-	
Талипов Н.Х.	38
Терещенко О.Е.	47,72
Тийс С.А.	34
Тимофеев В.А.	30,76
Тимофеев В.Б.	29
Тимофеева Т.Е.	50
Тимошенков С.П.	83
Ткаченко В.А.	51
Ткаченко О.А.	51
Торопов А.И.	26,37,39,66,72,
	80
Третьяков Д.Б.	13,39
Тысченко И.Е.	57,58

У

Ужаков И.Н.	32
Устинов В.В.	17

Φ

Феклистов К.В.	59
Филачев А.М.	20
Филиппов Н.С.	44
Фицыч Е.И.	64
Фомин Б.И.	62

Ц

Цан Д.Р.Т.	24
Царенко А.В.	41

Ч

Чайковский Ю.Б.	<i>49</i>
Черков А.Г.	57
Чичков В.И.	56

Ш

Шамирзаев Т.С.	37
Шарков М.Д.	31
Шаяхметов В.М.	<i>39</i>
Швец В.А.	32,45
Шевырин А.А.	26
Шегай О.А.	73
Шеремет Е.	24
Шестериков Е.В.	26
Шиляев А.В.	78
Широков А.Ю.	47
Шкляев А.А.	34,35
Шумский В.Н.	<i>40</i>

Щ		Я	
Щеглов Д.В.	39	Якимов А.И.	76
		Яковлева Н.И.	75
F		Якунин М.В.	17,64
Эдельман И С	56	Якушев М.В.	19,32,45,64,70,
Энтин В М	13 39		78,79
Onnun D.M.	10,07	Якшина Е.А.	13
		Ярошевич А.С.	39

Author index

Α		Μ	
Atmaca G.	77	Maude D.	80
G		Ν	
P.L.Grande	58	Narin P.	77
К		0	
Kutlu E.	77	Otsuji T.	18
L		S	
Lisesivdin B.S.	77	Satou A.	18
Lisesivdin S.B.	25,77	Sushkov O.P.	51